

# Influencia de los sistemas de gestión técnica de las instalaciones (domótica) en la calificación energética de los edificios

**Autor: Antonio Masdías y Bonome**

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5609-7812>

Email: [amasdias@udc.es](mailto:amasdias@udc.es)

---

## Tesis doctoral UDC / 2021

**Directores: Prof. Dr. José Antonio Orosa García**

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8384-908X>

Email: [jaorosa@udc.es](mailto:jaorosa@udc.es)

**Prof. Dr. José Luis Calvo Rolle**

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2333-8405>

Email: [jlcalvo@udc.es](mailto:jlcalvo@udc.es)

**Tutor: Prof. Dr. Jesús Diego Chouza Gestoso**

Scopus ID: 57214913737

Email: [jchouza@udc.es](mailto:jchouza@udc.es)

Programa de doctorado en Energía y Propulsión Marina

Escuela Técnica Superior de Náutica y Máquinas

Paseo de Ronda 51



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



## Dedicatoria

*A mis padres María del Carmen y Antonio por inculcar en mí sus valores, la educación, el esfuerzo y dedicación, siendo los primeros en animarme para realizar esta tesis.*

*A mi mujer, por su ayuda en lo técnico, pero, sobre todo, por acompañarme y tenerla siempre a mi lado, en todo lo que vivimos.*

*A mis hijos, que seguro disfrutarán de un futuro con una mayor eficiencia energética.*

## Agradecimientos

*Quiero agradecer a mis directores y tutor, a mis compañeros de departamento, el ánimo y la ayuda demostrada durante años, para que finalice este trabajo.*

*Del mismo modo al equipo humano de la empresa Seingenia, por su colaboración técnica en la instalación de equipos y acceso a las instalaciones, que han permitido la recopilación de datos reales de instalaciones durante un periodo superior a 3 años.*

*A todos... muchas gracias.*



## **Resumen**

El estudio del impacto de la gestión técnica de las instalaciones en la certificación energética de los edificios es la base de esta tesis. Durante su desarrollo se observaron las desviaciones existentes entre datos obtenidos de medición en edificios reales y valores estimados con los resultados de sus certificaciones energéticas. Algunos de estos resultados, mejoran las expectativas, pudiendo clasificar edificios con sistema de regulación y control “domótico” y edificios con una regulación convencional.

Con los resultados y el análisis de las posibles influencias externas mediante método de Montecarlo, se ha obtenido una metodología de modelización de los edificios, que nos permite optimizar de manera energética o económica las medidas de mejora a aplicar.

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....</b>	<b>9</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>3 MATERIALES Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 MATERIALES.....</b>	<b>17</b>
3.1.1 SOFTWARE HULC .....	17
3.1.2 SOFTWARE CE3X .....	18
3.1.3 SOFTWARE MINITAB .....	19
3.1.4 NORMA ISO 13790 .....	23
3.1.5 INSTRUMENTACIÓN DE MEDIDA DE DATOS REALES .....	27
3.1.5.1 DISEÑO HARDWARE .....	28
3.1.5.2 DISEÑO SOFTWARE .....	30
<b>3.2 MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
3.2.1 OBTENCIÓN DE DATOS EN EDIFICIOS EXISTENTES .....	36
3.2.1.1 EDIFICIOS TIPO 1 .....	38
3.2.1.2 EDIFICIOS TIPO 2 .....	39
3.2.1.3 EDIFICIO 1: URBANIZACIÓN LOS TILOS. SANTIAGO DE COMPOSTELA.....	40
3.2.1.4 EDIFICIO 2: EDIFICIO 24 VIVIENDAS EN PUENTEDEUME. LA CORUÑA .....	44
3.2.1.5 EDIFICIO 3: URBANIZACIÓN TIPO DISTRICT HEATING EN LUGO.....	47
3.2.1.6 EDIFICIO 4: DISTRICT HEATING DE 112 VIVIENDAS EN LA CORUÑA .....	53
3.2.1.7 EDIFICIO 5: EDIFICIO DE 66 VIVIENDAS EN LA CORUÑA .....	58
3.2.1.8 EDIFICIO 6: EDIFICIO RESIDENCIAL EN LA COSTA DE LUGO.....	61
3.2.1.9 EDIFICIO 7: EDIFICIO DE 76 VIVIENDAS EN LA CORUÑA .....	64
3.2.2 METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN EDIFICIOS REALES.....	68
3.2.3 AUTOMATIZACIÓN DE CALCULO ISO 13790 MEDIANTE HOJA DE CALCULO MS EXCEL. 69	
3.2.4 MÉTODO MONTECARLO.....	74
3.2.5 METODOLOGÍA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA.....	78
3.2.6 OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA .....	81
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>83</b>

<b>4.1</b>	<b>VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>83</b>
4.1.1	VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE DESVIACIONES ENTRE 13790 Y CE3X.....	83
4.1.2	ANÁLISIS DEL IMPACTO DE MEDIDAS CORRECTORAS EN EDIFICIOS REALES .....	89
4.1.2.1	ANÁLISIS DE DESVIACIONES EN EDIFICIOS TIPO 1 .....	101
4.1.2.2	ANÁLISIS DE DESVIACIONES EN EDIFICIOS TIPO 2 .....	108
<b>4.2</b>	<b>MODELADO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO .....</b>	<b>114</b>
4.2.1	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MONTECARLO .....	115
<b>5</b>	<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>119</b>
<b>5.1</b>	<b>DISCUSIÓN SOBRE MEDICIÓN REAL Y EFECTO DE LA DOMÓTICA.....</b>	<b>119</b>
5.1.1	DISCUSIÓN SOBRE LAS DESVIACIONES DE LOS VALORES REALES OBTENIDOS .....	120
5.1.2	ESTUDIO DE POSIBILIDADES DE ACTUACIÓN EN EFICIENCIA. ....	126
5.1.2.1	EDIFICIO PÚBLICO DE USO DEPORTIVO Y DOTACIONAL. ....	128
5.1.2.1.1	POSIBILIDADES DE ACTUACIÓN EN EFICIENCIA EN ESTE EDIFICIO .....	135
5.1.2.2	EDIFICIO PRIVADO DE USO RESIDENCIAL. ....	138
5.1.2.2.1	POSIBILIDADES DE ACTUACIÓN EN EFICIENCIA .....	139
<b>5.2</b>	<b>APLICACIÓN DEL MODELO.....</b>	<b>149</b>
5.2.1	RESULTADOS INICIALES Y SUS IMPLICACIONES ECONÓMICAS .....	149
5.2.2	OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA CON INVERSIÓN ECONÓMICA LIMITADA. ....	153
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>156</b>
<b>6.1</b>	<b>IMPACTO DE LA GESTIÓN TÉCNICA DE LAS INSTALACIONES EN LA CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA .....</b>	<b>156</b>
<b>6.2</b>	<b>APLICACIONES DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DISEÑADO.....</b>	<b>158</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>161</b>
<b>7.1</b>	<b>CÓDIGO FUENTE DEL PROTOTIPO DE LECTURA DE CONTADORES.....</b>	<b>161</b>
7.1.1	ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS: .....	161
7.1.2	CÓDIGO FUENTE DE LA APLICACIÓN WEB .....	162
7.1.2.1	INDEX.HTML: .....	162
7.1.2.2	VISUALIZABD.PHP .....	163
7.1.2.3	CONFIG/DBCONTROLLER.PHP .....	165
7.1.2.4	ENTRE.PHP .....	166
7.1.2.5	CALCULA.PHP .....	166
7.1.2.6	FECHA.PHP .....	168

---

7.1.2.7	CALCULA_DIA.PHP.....	168
7.1.2.8	LEE_CONTADORES.PHP.....	169
7.1.3	SCRIPT CRONTAB PARA LECTURA AUTOMÁTICA .....	172
<b>7.2</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>173</b>
<b>7.3</b>	<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>183</b>
<b>7.4</b>	<b>ARTÍCULO PUBLICADO .....</b>	<b>187</b>
<b>7.5</b>	<b>CAPÍTULO LIBRO .....</b>	<b>209</b>

## 1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El consumo energético del sector residencial en la Unión Europea representa el 39% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, tal y como se desprende de la información publicada en JRC Energy Report 2018<sup>1</sup>. Por este motivo, el impacto de optimizar la eficiencia de estos edificios implica no solo mejoras medioambientales, sino también reducción de la dependencia energética, y un notable cambio en el mix energético.

La preocupación por la mejora de la eficiencia energética de los edificios comenzó a manifestarse en la **Directiva 93/76/CEE** del Consejo, de 13 de septiembre de 1993, por la que se aprueba la Directiva "(SAVE)" [1], con el fin de limitar las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética. Dicha directiva enumera una serie de acciones que todos los estados miembros deberían poner en marcha para aumentar la eficiencia energética en edificios y, como consecuencia, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de toda Europa.

Posteriormente con la firma del protocolo de Kioto (1997), el marco legal europeo ha recogido la **preocupación por la eficiencia energética de los edificios**, que representa en Europa una media del 40% del consumo energético total, mediante la publicación de la **Directiva 2002/91/CE** (Energy Performance of Buildings Directive).

La **Directiva Europea 2002/91/CE** tiene como objetivo impulsar el desarrollo de la eficiencia energética de los edificios obligando, a todos los estados miembros, a que todo edificio, tanto si es de nueva construcción, como si se traspasa, se vende o se alquila; vaya acompañado de un "Certificado de Eficiencia Energética".

Esta directiva en España no se ha transpuesto a ordenamiento jurídico español hasta el año 2007, mediante la aprobación de las siguientes leyes:

- El denominado **Código Técnico de la Edificación** (CTE). R.D.314/2006.
- La realización de modificaciones al **Reglamento de Instalaciones Térmicas de edificios** (RITE).
- La publicación del **Real Decreto 47/2007**, de 19 de enero, que define la aplicación de una certificación energética a todos los nuevos edificios.

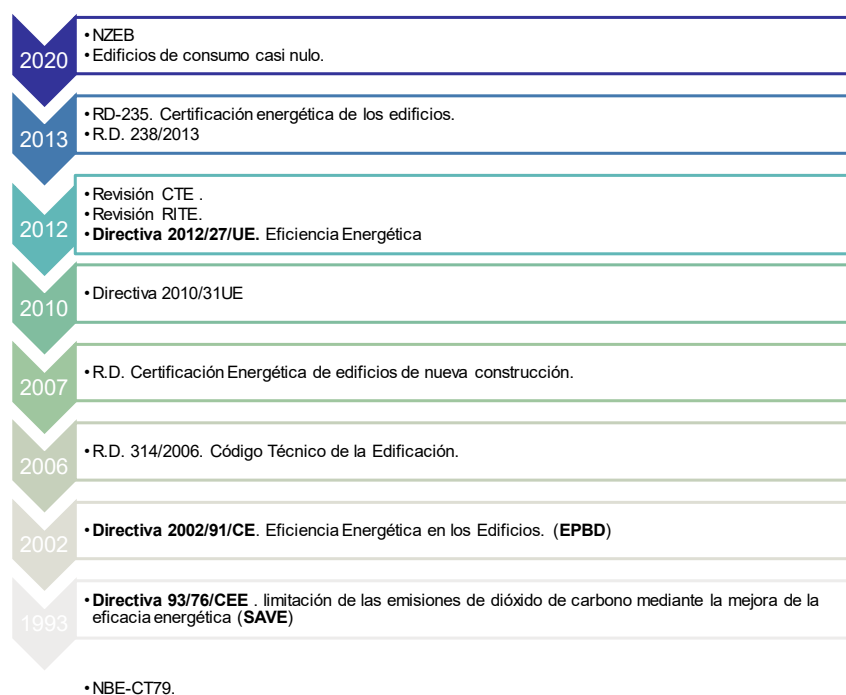
---

<sup>1</sup> JRC SCIENCE FOR POLICY REPORT – Energy consumption and energy efficiency trends in the EU-28 for the period 2000-2016 – Tsemekidi-Tzeiranaki, S., Bertoldi, P., Labanca, N., Castellazzi, L., Serrenho, T., Economidou, M., Zangheri, P. ISBN 978-92-79-98099-2 – 2018.

El Código Técnico se ha venido reformando desde su publicación en el año 2006, hasta el reciente Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación. Desde entonces, ha venido aumentando los requisitos de optimización energética de los nuevos edificios, tanto en materiales, envolvente, instalaciones, así como aumentando las contribuciones mínimas de **energías renovables**.

El RD. 47/2007 traspuso la Directiva de manera parcial, ya que todavía no se incluía la certificación energética de los edificios existentes, cuya incorporación debería haberse producido antes de enero de 2009, y en España hasta el año 2013 no se vio incorporada a la legislación mediante la publicación del R.D. 235/2013.

Posteriormente en el año 2010, la directiva fue refundida en la **Directiva 2010/31/UE**, incorporando conceptos muy importantes como el de edificio nZEB (Edificios de Consumo Energético casi Nulo) [2] [3], obligando a cumplir que todos los edificios nuevos que se construyan a partir del 31 de diciembre de 2020, sean edificios de consumo casi nulo. También fija unos objetivos de reducción de consumo, aumento del uso de energías renovables, y mejora de la eficiencia de un 20% para el año 2020.



**Figura 1. Evolución de la legislación y normativa hacia nZEB.**

Si bien con las diferentes revisiones y seguimientos anuales, se ha estado constatando la imposibilidad de cumplimiento de esta Directiva “denominada 20-20-20” dentro de los plazos marcados. En el año 2012 se

publicó la **Directiva 2012/27/UE** del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética, con el fin de establecer el marco legal común de toda la Unión Europea, en materia de eficiencia energética, reforzando dichos objetivos, así como impulsar que las actuaciones en mejora de la eficiencia energética vayan más allá del año 2020. A esta directiva le siguió la **Directiva (UE) 2018/2002** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, por la que se modificó la Directiva 2012/27/UE en materia de contenido y plazos.

En general la Directiva EPBD<sup>2</sup> está articulada en torno a cuatro elementos principales:

- Creación de una **metodología común de cálculo** del rendimiento energético integrado de todos los edificios de la Unión.
- Establecer unas **normas mínimas** relativas al rendimiento energético tanto de los edificios nuevos como de los ya existentes **cuando se proceda a una reforma** importante.
- **Establecimiento de Sistemas de certificación** de edificios (tanto nuevos como existentes) y obligatoriedad de exhibición de estos certificados.
- **Establecimiento de un control regular** de las calderas y de los sistemas centrales de climatización en los edificios y evaluación de las instalaciones de calefacción cuyas calderas tengan más de 15 años.

La metodología común de cálculo **debería integrar todos los elementos** que determinan la eficiencia energética y no únicamente la calidad del aislamiento del edificio. Este enfoque integrado debería tener en cuenta elementos como las instalaciones de calefacción y de refrigeración, las instalaciones de iluminación, la localización y orientación del edificio, la recuperación del calor, fuentes de energía renovable, etc [4].

Las normas mínimas para la construcción de los edificios, se calculan en función de la metodología descrita anteriormente. Los Estados miembros deberán fijar las normas mínimas.

Por otro lado, estamos asistiendo a grandes avances de la tecnología y su incorporación tanto a los hogares (unifamiliares o multifamiliares), como al resto de edificios. La aparición de los denominados sistemas domóticos/inmóticos<sup>3</sup> y su incorporación a los edificios cada vez es más frecuente.

---

<sup>2</sup> EPBD. Energy Performance of Buildings Directive es como se conoce a la Directiva Europea 2002/91/CE

<sup>3</sup> Inmótica: Es la domótica aplicada a los edificios de sector terciario.

Algunos autores [5] mantienen la tesis de que la domótica comenzó cuando el hombre pasó del nomadismo al sedentarismo. Este hecho provocó que se incorporasen “las tecnologías de la época” al hogar, como ejemplo el poder mantener el fuego dentro de la cueva (proporcionaba confort y seguridad). A lo largo de la historia del hombre esta incorporación de las tecnologías al hogar se ha venido realizando hasta nuestros días.

En la actualidad, el uso de la electrónica, las tecnologías de la información y comunicación, así como la posibilidad de integrar y gestionar todas las instalaciones de los edificios han configurado el marco de desarrollo de la domótica.

En el sector de la domótica, multitud de empresas de todo el mundo han desarrollado diferentes sistemas de gestión y control de edificios (BMS<sup>4</sup>), si bien este desarrollo se podría clasificar en 3 claras vertientes: la americana, la japonesa y la europea que se está consolidando mediante la aparición de la asociación europea KONNEX [6] [7].

La legislación española consciente de esta incorporación, desde antes del año 2002<sup>5</sup> ya dejaba marcados los principios de su utilización en el Reglamento electrotécnico de Baja Tensión [8]. Más recientemente, en el año 2006 con la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación [9], se observa que, en determinados aspectos del cumplimiento de dicho Código, prácticamente **se exige la utilización de dichos sistemas de gestión** de las instalaciones. Un ejemplo lo vemos en el Documento Básico HE3: Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación, donde el proyectista deberá comprobar si, debido a la tipología, orientación, y arquitectura del edificio y sus colindantes, es necesario incorporar un sistema de regulación de la iluminación o no.

A nivel normativo, la norma europea EN 15232:2007, ya contempla la aparición de sistemas de gestión energética en edificios. Esta norma ha evolucionado y actualmente en España se trabaja con la UNE-EN 15232-1:2018 [10].

La utilización de estos sistemas domóticos/inmóticos para la iluminación en edificios de sector terciario (oficinas, hoteles, usos docentes, ...), además de provocar una mejoría en el confort visual, reducirá en gran medida la demanda y consumo energético del edificio.

---

<sup>4</sup> Building Managenemt System. Sistema de Gestión de Edificios.

<sup>5</sup> Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión 2002. Establece en la ITC-BT 51 los criterios que deben cumplir las instalaciones eléctricas que prevean la incorporación de un Sistema de Gestión Técnica de las Instalaciones.



La definición inequívoca de domótica se puede concretar en la “Gestión Técnica de las instalaciones”. Es por tanto el conjunto de sistemas capaces de automatizar una vivienda o edificio, aportando servicios de gestión energética, seguridad, confort y comunicación. No existirá domótica si falta alguno de estos pilares.



**Figura 2. Pilares que sustentan el concepto de la “domótica”.**

El que una vivienda disponga de una alarma (seguridad), un termostato de calefacción (energía), teléfono (comunicaciones) y riego automático (confort), no la dota de domótica. La domótica INTEGRA esos pilares, y el ejemplo anterior no dispone de integración, cada elemento trabaja de forma individual.

La diferencia entre una simple central de alarma de una vivienda y una central domótica es que la primera avisaría si hay un robo. La segunda además de avisar (comunicaciones), será capaz de cerrar las persianas y arrancar el riego automático (seguridad y confort) para hacer más difícil la tarea de robar, e incluso cortar la iluminación o hacerla centellear (energía), para indicar que está sucediendo algo.

En la actualidad, la necesidad de gestionar el uso responsable de la energía, la aparición de las tecnologías para la generación distribuida, y la obligación normativa internacional hace que estos sistemas de gestión tengan cada día mayor importancia.

Muchos fabricantes empiezan a desplazar sus actuales sistemas BMS a sistemas denominados BeMS (Building Energy Management System). Los nuevos sistemas BeMS<sup>6</sup> no son más que los mismos sistemas de gestión técnica de edificios con una programación que optimiza el uso eficiente de la energía [11] [12] [13].

---

<sup>6</sup> El analista de mercados “Navigant Research”, ahora denominada “Guidehouse Insights”, ha definido BeMS como Sistema de monitorización y control basados en TI que se vincula con las tendencias de datos sobre consumo de energía de

La herramienta BMS fue concebida como una herramienta eficaz energética y constructivamente, pero dispone de todas las herramientas para responder a las ineficiencias. Por tanto, es perfectamente capaz de ahorrar grandes cantidades de energía y dinero, ya sea gas, electricidad o agua. En definitiva, la clave entre un BMS y un BeMS es la estrategia de control que se adopte.

En la actualidad el modelo de certificación energética diseñado contempla por una parte los **aspectos arquitectónicos** de la edificación ( *materiales de construcción, zona geográfica, orientación, aislamientos, huecos y su tipología ...* ), y por la otra las características del **equipamiento e instalaciones de la edificación** ( *iluminación, calefacción, refrigeración, bombas de calor, paneles solares, demanda de ACS<sup>7</sup>, demanda de climatización ...* ). Con todo ello y la utilización de un software desarrollado por el Ministerio de la Vivienda se obtiene un EDIFICIO MODELO con una demanda energética, paralelamente el software con los datos de la arquitectura e instalaciones construye el EDIFICIO OBJETO del proyecto y obtiene una calificación por comparación [14] .

Una vez obtenida la calificación, y viendo que esta se encuentra dentro de los límites de demanda energética establecidos por la legislación, se puede intentar optimizar energéticamente el edificio, de una forma fácil y sencilla. Simplemente analizando el impacto de medidas concretas como por ejemplo el aumento de los aislamientos de la envolvente, el incremento del uso de energías renovables, o cambio en la tecnología de generación térmica, podemos ver los resultados y obtener una mejor o peor calificación [15].

Como vemos en el caso de edificios de nueva construcción, la decisión de qué tecnologías aplicar, o qué materiales y métodos de construcción seguir, pueden ser bastantes simples y solo condicionados por el incremento en el coste o la inversión posterior en mantenimiento preventivo y correctivo [16].

Sin embargo, el hecho de la optimización energética de edificios, en ocasiones es extremadamente importante en **edificios existentes**, donde tenemos realizar actuaciones y no siempre con total libertad, al estar condicionados por ser un edificio ya existente, estar limitados económicamente, disponer de restricciones arquitectónicas como una protección patrimonial, etc. [17].

Todas las herramientas de certificación energética que analizan el impacto de medidas concretas de actuación realizadas en los edificios, lo hacen partiendo de valores concretos de la arquitectura del edificio,

---

un edificio, (sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado) permitiendo la visualización y análisis de dichos datos para permitir una mejor toma de decisiones sobre energía.

<sup>7</sup> ACS: Abreviatura de Agua Caliente Sanitaria.

usan valores concretos de los equipos e instalaciones, usan valores concretos de climatología de la zona, y aplican criterios concretos de uso y ocupación [18].

A modo de ejemplo, podemos observar que en ocasiones el cambio de una caldera con 25 años de antigüedad y combustible diésel, se puede transformar fácilmente a una caldera de condensación a gas natural. Esta transición si se analiza con cualquier herramienta de certificación, nos mejorará considerablemente por rendimiento y emisiones de CO<sub>2</sub>, considerando que la caldera inicial tiene un rendimiento estacional anual cercano al 65% y la nueva caldera de condensación cercano al 100%. Sin embargo, si el sistema de control de la instalación no tiene en cuenta que para que la caldera de condensación rinda incluso por encima del 100% en valores basados a PCI, aprovechando el poder calorífico superior, requiere que su temperatura de trabajo no supere la temperatura de condensación (61°C aprox.). Si mantenemos el sistema de control de la instalación anterior, (que típicamente trabaja a 80°C), la caldera nunca trabajará en condensación, y por lo tanto su comportamiento energético no distará mucho del actual [19].

La medida tomada inicialmente que buscaba un ahorro energético y por lo tanto económico, con una inversión determinada, verá mermada la recuperación de la inversión, y no verá cumplidas las expectativas obtenidas mediante simulación en la certificación energética. Quizá el importe de la inversión efectuada tendría mayor impacto económico y energético de haberse aplicado en otra componente del edificio.

## 2 OBJETIVOS

Todos somos conscientes de que **los hábitos de consumo** del usuario influyen directamente en la demanda energética [20], *(el mismo vehículo consumirá más o menos dependiendo de quién lo conduzca)*, la investigación pretende realizar un **análisis de sensibilidad de la calificación energética** de los edificios *(residencial y sector terciario)* con el fin de valorar el impacto de disponer o no de sistema domótico/inmótico que pudiese optimizar, racionalizar y minimizar el consumo energético. Todo ello en base a datos reales obtenidos en la zona Norte de Galicia, provincias de La Coruña y Lugo.

Los resultados de la investigación deberán de arrojar, por una parte:

- Qué actuaciones en la definición de un edificio y de sus instalaciones, se deberán realizar con el objetivo de optimizar su certificación energética, minimizando el impacto en la inversión, siendo esta viable económicamente o siendo factible el volumen de obra.
- Qué impacto en la calificación energética se producirían en el proyecto de un edificio con las mismas instalaciones, pero gestionadas y reguladas por un sistema de gestión técnica de las instalaciones (domótica).
- Qué impacto en la calificación energética se producirían en un edificio ya construido que mantiene las mismas instalaciones, pero estas pasan a ser controladas por un sistema domótico.
- Analizar si la metodología utilizada en la certificación energética de los edificios, puede o debe ser complementada para optimizar las decisiones de actuación en eficiencia.

Las conclusiones deberían decidir si el modelo de calificación energética actual debería o no ser revisado o modificado para incorporar en el modelo de definición del edificio, los sistemas de gestión técnica de las instalaciones.

### **3 MATERIALES Y METODOLOGÍA**

Las metodologías utilizadas en esta tesis no se basan solo en la técnica documental sino también en la de campo, para lo que se ha establecido una metodología y mecánica de recopilación de datos, para posteriormente proceder a su análisis e interpretación de resultados.

A continuación, se pasan a detallar cada uno de los materiales y métodos utilizados.

#### **3.1 MATERIALES**

##### **3.1.1 SOFTWARE HULC**

La Herramienta Unificada Líder Calener, es una herramienta software desarrollada por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, aglutinando en una sola aplicación las herramientas LIDER y CALENER VYP que fueron desarrolladas previamente por un grupo del departamento de Termotecnia de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Sevilla pertenecientes a la Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía (AICIA).

La herramienta cumple lo establecido en el artículo 4.1 del R.D. 235/2013 siendo el procedimiento para la calificación de eficiencia energética de un edificio desde el 14 de enero de 2016. Utiliza como motor de cálculo ESTO 2 basado en el DOE2 desarrollado por el Departamento de Energía de los EE.UU. a través del grupo de investigación del laboratorio Lawrence Berkeley National Laboratory.

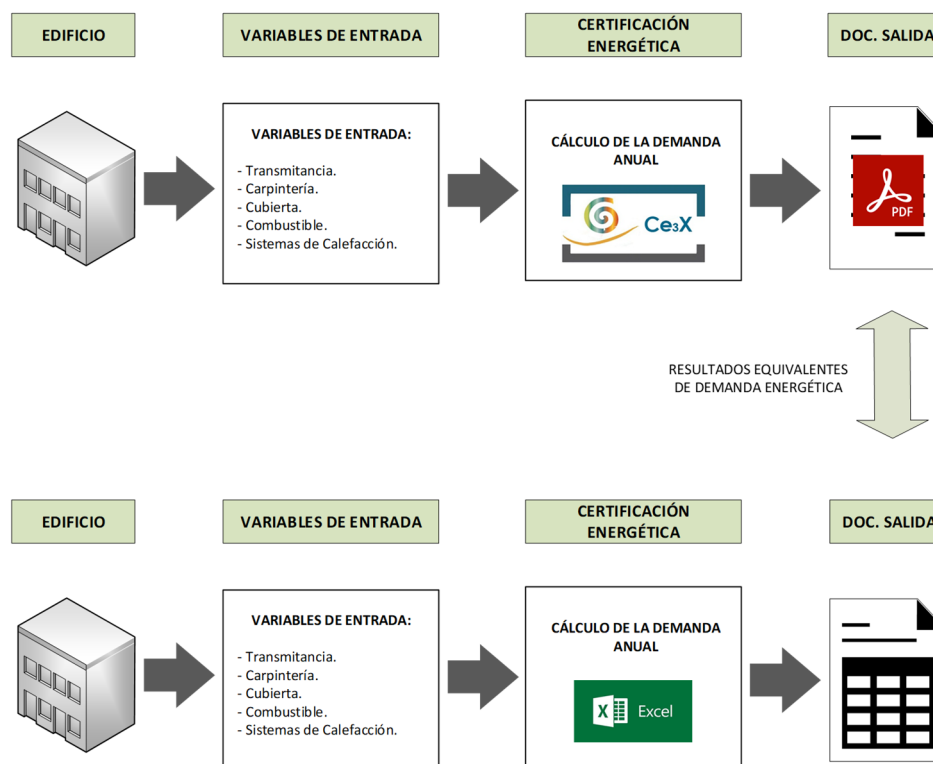
La actualización de la metodología de certificación energética en España ha incorporado no solo las últimas modificaciones del Código Técnico de la Edificación en el ámbito de la demanda energética (Documento Básico HE0 ) sino también las últimas modificaciones del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios<sup>8</sup> (RITE).

Durante la utilización de esta herramienta como material para el desarrollo de esta tesis, ha surgido el problema en la introducción de datos de entrada, ya que la modificación de un solo parámetro de entrada obliga a generar un nuevo proyecto antes de proceder a arrancar el motor de cálculo. Para analizar los resultados obtenidos producto de la variación de múltiples combinaciones de parámetros de entrada, observamos una enorme complejidad al ser necesario modificar parámetro a parámetro y calcular la certificación en cada caso. Este proceso genera una gran cantidad de archivos de entrada y de salida de difícil tratamiento [21].

---

<sup>8</sup> R.I.T.E. R.D. 1027/2007 por la que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios.

Por este motivo se procede a buscar una alternativa acorde a lo expresado en la Figura 3 , que simplifique tanto la elaboración como la obtención de múltiples resultados.



**Figura 3. Proceso de certificación mediante herramienta Ce3X y alternativa mediante hoja de cálculo.**

### 3.1.2 SOFTWARE CE3X

La Herramienta Ce3X ha sido desarrollado por la empresa Efinovatic y el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER).

El programa es propiedad del instituto de Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) perteneciente al Ministerio de Industria, y su distribución es gratuita. La versión actual es Ce3Xv2.3.

Mediante este programa se puede certificar de una forma simplificada cualquier tipo de edificio: residencial, pequeño terciario o gran terciario, pudiéndose obtener cualquier calificación desde "A" hasta "G". Es una de las herramientas más utilizadas en la certificación de edificios existentes, entre otras cosas porque integra funciones que permiten introducir tanto la envolvente térmica como las instalaciones mediante:

- Valores "conocidos"
- Valores "estimados"

- Valores “por defecto”

Uno de los objetivos principales de Ce3X es que se vaya adaptando a la evolución del sector y que permita ampliar sus funcionalidades. Para ello permite la instalación de Complementos como los que pueden ser descargados desde el menú Complementos de esta página web [22] [23].

Dentro de estos complementos, la herramienta comienza a facilitar posibilidades de actuación en eficiencia. Todas las “sugerencias” nos informan con un pre-cálculo del impacto en la demanda y certificación que van a influir en nuestro edificio. El técnico certificador dispone de esta manera de una herramienta que facilita la selección de medidas de mejora a proponer en el edificio analizado.

### 3.1.3 SOFTWARE MINITAB

Se trata de una herramienta software diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas. Permite introducir datos tabulados de herramientas como Microsoft Excel, pero con la capacidad de ejecución de análisis estadísticos.

La herramienta se empezó a desarrollar en 1972, cuando profesores del programa de análisis estadísticos de la Universidad Estatal de Pensilvania (Pennsylvania State University) desarrollaron MINITAB [24] como una versión ligera y optimizada del anterior OMNITAB 80<sup>9</sup>, un programa de análisis estadístico del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de los Estados Unidos.

Hoy en día Minitab Inc.® dispone dentro de la versión Minitab V18, de multitud de herramientas de optimización, estadística, y regresión. El principal uso de la herramienta en esta tesis será para la obtención de modelos de superficies de respuesta. Con estos polinomios podremos conocer el comportamiento del edificio con valores multi-variable y por lo tanto llevar a cabo el estudio de optimización numérica respecto a cada variable objetivo.

---

<sup>9</sup> <https://www.nist.gov/itl/sed/omnitab-80>

A modo de ejemplo, en la Figura 4, se observan algunas de las variables utilizadas en la obtención de la certificación energética de un edificio, con valores de infiltración de aire, transmitancia de fachadas, cubiertas, tipo de combustible, rendimiento, aporte fotovoltaico, coste de las actuaciones, y con todas estas variables obtenemos un consumo de energía primaria. Un ejemplo de datos de entrada puede observarse en la Tabla 1. Tabla de datos de entrada introducidos en MINITAB, para la obtención de una superficie de respuesta.

INFILTRACIONES	U. FACHADA	U. CUBIERTA	COMB_CAL	REA_CAL	COMB_ACS	REA_ACS	FV	COSTE ACTUACIONES	CONSUMO RESULTANTE
50	1,69	2,27	0	0,75	0	0,999	-	30950	230,4523112
27	1,69	2,27	0	0,75	0	0,999	-	33950	229,7574124
9	1,69	2,27	0	0,75	0	0,999	-	36950	229,6722224
50	1,69	0,45	0	0,75	0	0,999	-	59105	217,2641483
27	1,69	0,45	0	0,75	0	0,999	-	62105	181,2743598
9	1,69	0,45	0	0,75	0	0,999	-	65105	186,0030333
50	1,69	0,45	1	1	1	1	-	87260	175,4613518
27	1,69	0,45	1	1	1	1	-	90260	152,3274624
9	1,69	0,45	1	1	1	1	-	93260	164,0651146
50	1,69	2,27	1	1	1	1	-	59105	126,3799797
27	1,69	2,27	1	1	1	1	-	62105	116,5412135
9	1,69	2,27	1	1	1	1	-	65105	141,1342622
50	1,69	2,27	1	1	1	1	-	95985	162,1595946
27	1,69	2,27	1	1	1	1	-	98985	171,9994088
9	1,69	2,27	1	1	1	1	-	101985	169,9691877
50	0,55	2,27	0	0,75	0	0,999	-	152950	234,8536367
27	0,55	2,27	0	0,75	0	0,999	-	155950	176,2479338
9	0,55	2,27	0	0,75	0	0,999	-	158950	210,0353373
50	0,55	0,45	0	0,75	0	0,999	-	181105	213,1206642
27	0,55	0,45	0	0,75	0	0,999	-	184105	186,3927867
9	0,55	0,45	0	0,75	0	0,999	-	187105	203,9799615



50	0,55	0,45	1	1	1	0,999	-	209260	128,917982
27	0,55	0,45	1	1	1	0,999	-	212260	118,7361156
9	0,55	0,45	1	1	1	0,999	-	215260	140,2811445
50	1,69	0,45	1	1	1	0,999	-	95985	141,3443027
27	1,69	0,45	1	1	1	0,999	-	98985	162,6732307
9	1,69	0,45	1	1	1	0,999	-	101985	156,3320164
50	0,55	0,45	1	1	1	0,999	-	217985	121,5952665
27	0,55	0,45	1	1	1	0,999	-	220985	104,7065865
9	0,55	0,45	1	1	1	0,999	-	223985	143,4480654
50	1,69	2,27	0	0,75	0	0,999	25,00	60950	241,2240823
27	1,69	2,27	0	0,75	0	0,999	25,00	63950	251,8071708
9	1,69	2,27	0	0,75	0	0,999	25,00	66950	219,630386
50	1,69	2,27	0	0,75	0	0,999	12,50	45950	217,9427081
27	1,69	2,27	0	0,75	0	0,999	12,50	48950	217,2478093
9	1,69	2,27	0	0,75	0	0,999	12,50	51950	217,1626193
50	1,69	2,27	1	1	1	1	25,00	74105	124,9795892
27	1,69	2,27	1	1	1	1	25,00	77105	124,5017867
9	1,69	2,27	1	1	1	1	25,00	80105	124,4432126

Con los datos introducidos en el software Minitab, de forma similar a la introducción de datos en una hoja de cálculo convencional, se procede a la creación de un diseño de superficie de respuesta. En esta introducción necesitamos informar al software de los límites mínimo y máximo, que son los límites de validez de los modelos, para finalmente obtener un polinomio que modeliza los datos previamente obtenidos.

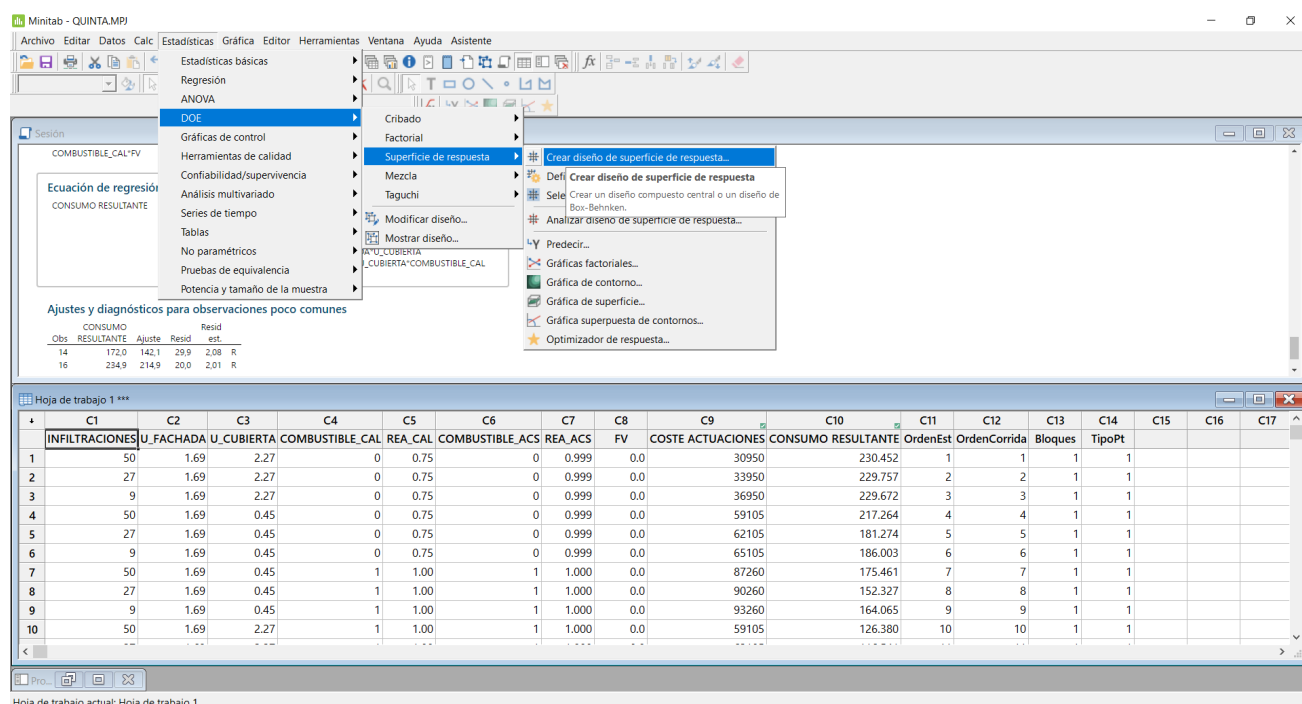
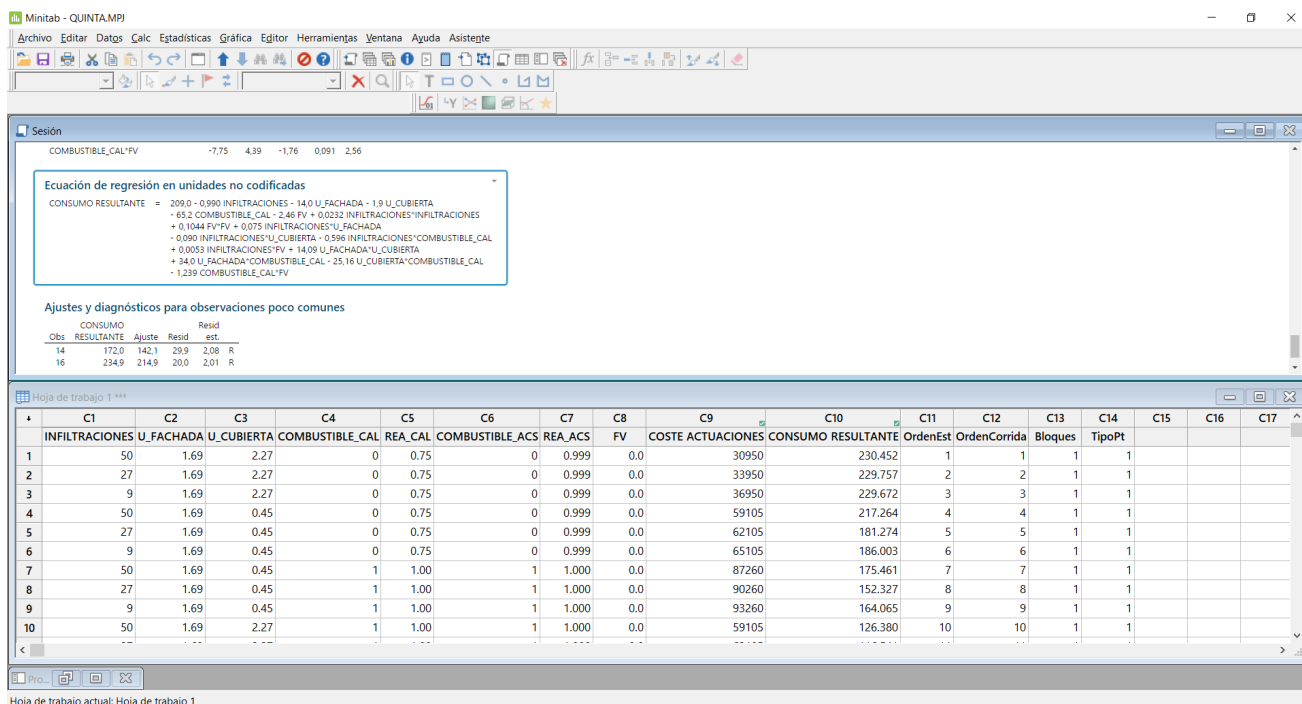


Figura 5. Pantalla de introducción de datos en MINITAB para el diseño de la superficie de respuesta.

Finalmente se obtiene la ecuación de ajuste multivariable, obtenida por ajuste de mínimos cuadrados, como puede observarse en la Figura 6. Imagen del polinomio obtenido que define la respuesta del sistema ante las diferentes variables de entrada presentadas.



**Figura 6.** Imagen del polinomio obtenido que define la respuesta del sistema ante las diferentes variables de entrada presentadas.

Al tratarse de un modelo, el software realiza un informe detallando el error obtenido, valorando dicha precisión con un valor de “R cuadrado” o también denominado coeficiente de determinación o de correlación múltiple. En el caso anterior se observa un valor de coeficiente de correlación de 91,08 %, lo que nos indica que el modelo tiene alta precisión en los resultados.

Minitab, en el informe de resultados, nos aporta también la variable “R cuadrado ajustado”. Esta variable nos permite observar la dependencia real de las diferentes variables utilizadas en el sistema. Si hemos introducido variables independientes que no afectan en gran medida al sistema, veremos diferencias considerables entre R cuadrado y R cuadrado ajustado.



**Figura 7. Vista del resumen del modelo calculado por Minitab, y el valor de  $R^2$ .**

### 3.1.4 NORMA ISO 13790

Como base para el análisis de edificios, es necesario modelizarlos. En la actualidad, fruto de la aplicación del R.D. 235/2013, los Ministerios de Industria, Energía y Turismo, junto con el de Fomento, han delegado la tarea de poner a disposición del público metodologías válidas para la calificación de eficiencia energética de los edificios, al Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Este organismo ha procedido a reconocer diferentes herramientas software como válidas para la certificación energética de edificios.

En la actualidad se encuentran reconocidos los siguientes programas:

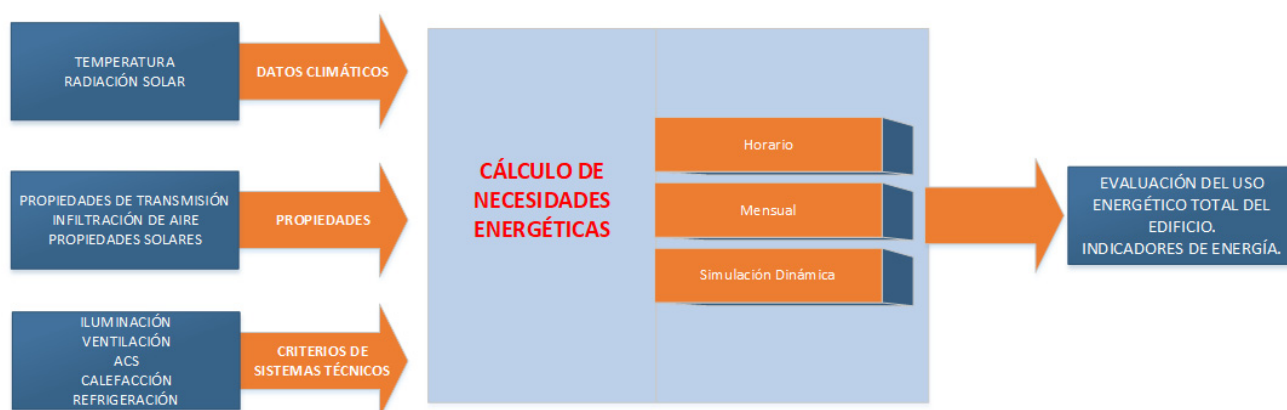
- Herramienta Unificada Lider Calener 2013 (HULC) [25]
- CYPETHERM HE Plus de CYPE Ingenieros
- SG SAVE
- SOFTWARE C3X. [26]
- El Programa informático CERMA.

A nivel europeo se aprobó ya en el año 1.999 la prEN ISO 13790:1999 que daría forma final al estándar ISO 13.790:2004, revisado en el año 2008. En España se traspuso a norma UNE-EN ISO 13790:2011 como “Eficiencia energética de los edificios. Cálculo del consumo de energía para calefacción y refrigeración de espacios. (ISO 13790:2008)”. [27] [28] [29] [30]

En la actualidad, muchos de los programas utilizados, tanto a nivel nacional como internacional, utilizan dicho estándar ISO, que en líneas generales opera con las siguientes entradas mostradas en la Figura 8. Entradas y salidas de los sistemas de evaluación energética de edificios como la ISO 13790.

En este sentido, la ISO13790 emplea tres procedimientos de cálculo para definir las necesidades energéticas de calefacción y refrigeración, pero todos ellos se centran en la transferencia de energía en el sistema de construcción en una o múltiples zonas.

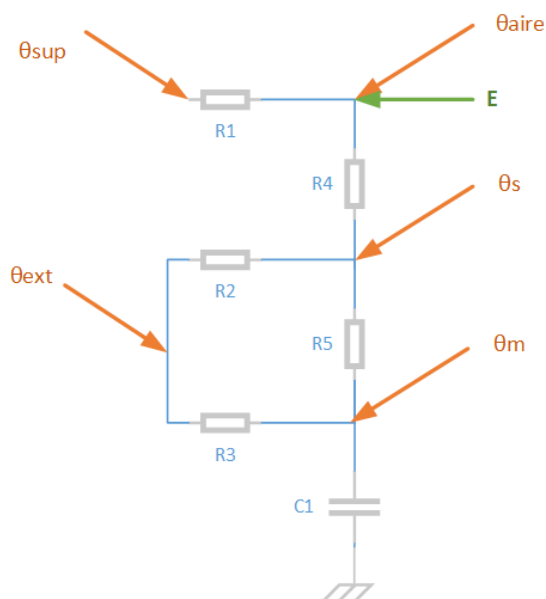
1. Método estacional;
2. Método horario simplificado;
3. Método de simulación detallado o dinámico



**Figura 8. Entradas y salidas de los sistemas de evaluación energética de edificios como la ISO 13790.**

Es interesante resaltar que el segundo procedimiento de esta norma UNE-EN ISO 13790:2011, basa la metodología de cálculo<sup>10</sup> en la definición de un circuito eléctrico equivalente del edificio, modelizado mediante 5 resistencias y una capacitancia (5R1C) tal y como se muestra en la Figura 9. Esquema eléctrico del Modelo 5R1C descrito en la UNE EN ISO 13790:2011. [31] [32]

<sup>10</sup> Jacob, D.; Burhenne, S.; Florita, A.R.; Henze, G.P. Optimizing building energy simulation models in the face of uncertainty. In Proceedings of the Fourth National Conference of IBPSA-USA, New York, NY, USA, 11–13 August 2010.



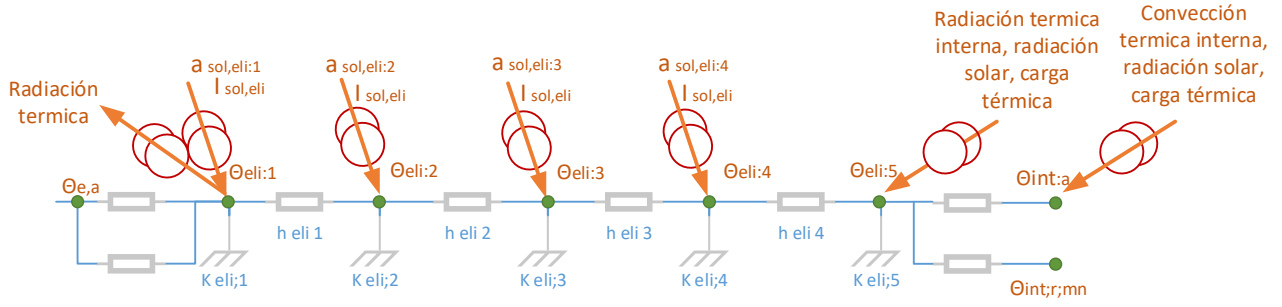
**Figura 9. Esquema eléctrico del Modelo 5R1C descrito en la UNE EN ISO 13790:2011.**

En la figura anterior, cada elemento tiene la siguiente función:

- R1: Coeficiente de transmisión por ventilación (W/K).
- R2: Coeficiente de transmisión de huecos (W/K).
- R3: Coeficiente de transmisión entre temperatura exterior y de masa (W/K).
- R4: Coeficiente de transmisión entre temperatura interior y de referencia (W/K).
- R5: Coeficiente de transmisión entre temperatura de masa y de referencia (W/K).
- $\theta_{sup}$ : Temperatura del aire de entrada (K).
- $\theta_{aire}$ : Temperatura del aire interior (K).
- $\theta_{ext}$ : Temperatura exterior (K).
- $\theta_m$ : Temperatura de la masa (K).
- $\theta_s$ : Temperatura de referencia (K).
- E: Energía horaria necesaria para calentamiento/refrigeración (W/m<sup>2</sup>).

En base a esta metodología, la norma contempla la posibilidad de realización de cálculos horarios, mensuales o con simulación dinámica.

Esta misma metodología se ha perfeccionado recientemente con la aparición de la UNE-EN ISO 52016-1:2017 que basa el cálculo en un modelo tipo RC de estructura descrita en la Figura 10. Modelo RC descrito en la UNE EN 52016 RC model.



**Figura 10. Modelo RC descrito en la UNE EN 52016 RC model.**

Esta nueva metodología varía la forma de evaluar el edificio, pasando de un análisis horario a un estudio en régimen dinámico dependiente del tiempo.

En el análisis de esta tesis, se utilizarán los valores obtenidos de la demanda, según ISO 13790 en series mensuales.

Este método se estableció en tres secciones para definir las necesidades de energía de calefacción y refrigeración de un edificio. Primero, para el consumo de energía de calefacción, la ISO 13790: 2011 define las Ecuaciones ( 1 ) ( 2 ).

$$Q_{H,nd} = Q_{H,nd,cont} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn} \quad (1)$$

donde  $Q_{H,nd,cont}$ , es la energía necesaria como calentamiento continuo (MJ),  $Q_{H,ht}$  es la transferencia de calor total (MJ),  $Q_{H,gn}$  son las ganancias de calor totales (MJ) y  $\eta_{H,gn}$  representa un factor adimensional de uso de las ganancias de calor(MJ). Para el consumo de energía de refrigeración, la ISO propone la Ecuación ( 2 ).

$$Q_{C,nd} = Q_{C,nd,cont} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} \quad (2)$$

donde  $Q_{C,nd,cont}$ , es la energía de enfriamiento continua necesaria (MJ),  $Q_{C,nd,cont}$  es transferencia de calor para el enfriamiento modo (MJ),  $Q_{C,gn}$  son las ganancias de calor totales (MJ) y  $\eta_{C,ls}$  representa un factor adimensional de las pérdidas de calor (MJ). Finalmente, para cada zona del edificio y periodo de cálculo (por mes en nuestro caso), la transferencia de calor es calculado de acuerdo con la Ecuación (3):

$$Q_{ht} = Q_{tr} + Q_{ve} \quad (3)$$

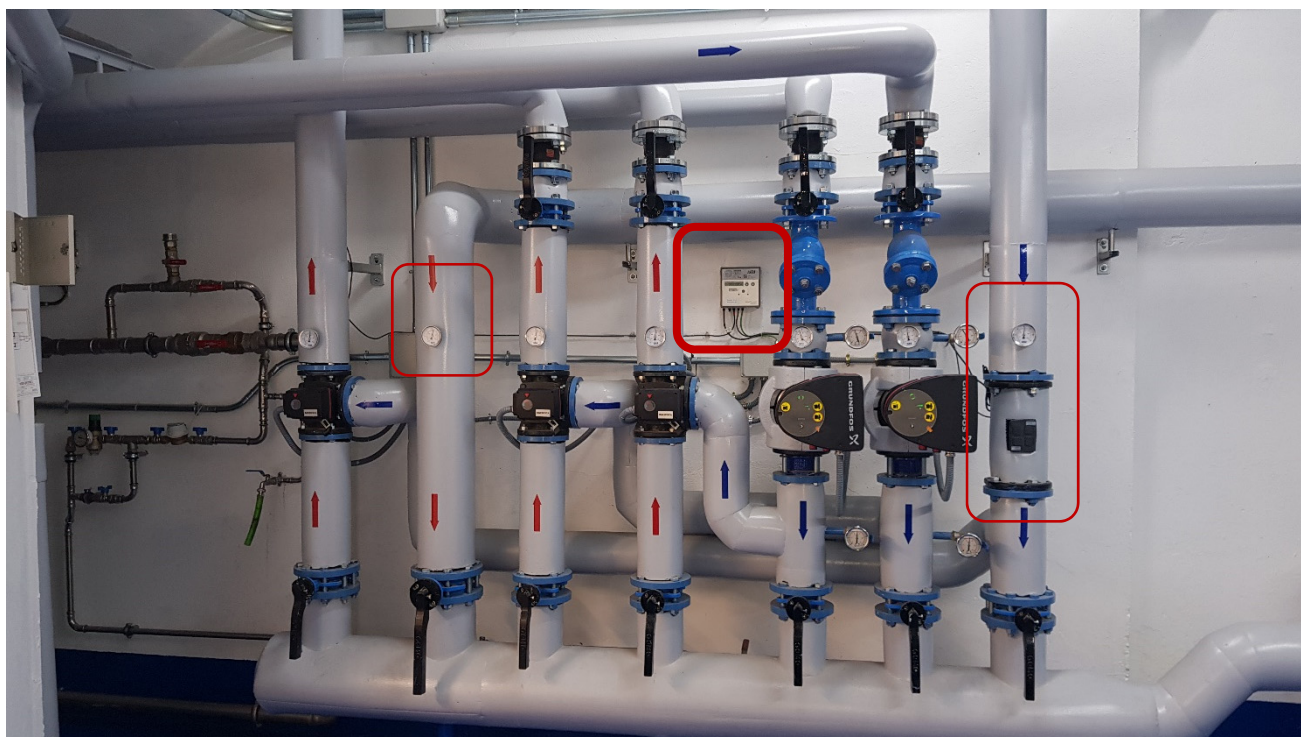
donde  $Q_{tr}$  es la transferencia de calor total (MJ) y  $Q_{ve}$  es la transferencia de calor total por ventilación (MJ). Finalmente, las ganancias totales de calor están definidas por la Ecuación ( 4 ).

$$Q_{gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (4)$$

donde  $Q_{int}$  son las ganancias totales de calor interno en el período de cálculo (MJ) y  $Q_{sol}$  son el total de energía solar ganancias de calor durante el período de cálculo (MJ).

### 3.1.5 INSTRUMENTACIÓN DE MEDIDA DE DATOS REALES

Como material para elaborar análisis y contrastar estos con valores reales, es necesario poder obtener lecturas de consumo en instalaciones reales. Desde la aplicación del RITE de 1998, en España es obligatoria la instalación de contadores de energía en viviendas. El contaje de energía útil (calor/frío) a la salida de la generación también es obligatorio desde hace años, permitiendo evaluar el rendimiento real de los equipos de generación.



**Figura 11.** Imagen de equipo de medida de energía general de sala de calderas. Fotografía: elaboración propia.

La mayor parte de estos equipos de medida de energía térmica, disponen de comunicación por diversos protocolos. En concreto, la mayor parte de ellos disponen de comunicación mediante el estándar “M-BUS”.

El estándar M-BUS<sup>11</sup> es un sistema desarrollado para cubrir la necesidad de leer remotamente contadores de energía, gas, electricidad o agua. La mayor parte de los equipos instalados hoy en día cumple con este protocolo, definido en una norma UNE-EN 1434-3:2016 [33]. Cuando se le envía una petición al contador, este devuelve toda la información que ha recogido en su memoria, para ser trasladada a otro dispositivo de su red denominado “maestro”. Este dispositivo “maestro” puede ser, por ejemplo, un

---

<sup>11</sup> Meter Bus. Es un estándar de comunicación acorde a la UNE EN 13757-2. <http://www.m-bus.com>



ordenador, una estación, o cualquier dispositivo electrónico, que se conecta a intervalos periódicos para leer todos los contadores de una sala de calderas o de las diferentes viviendas de un edificio residencial.

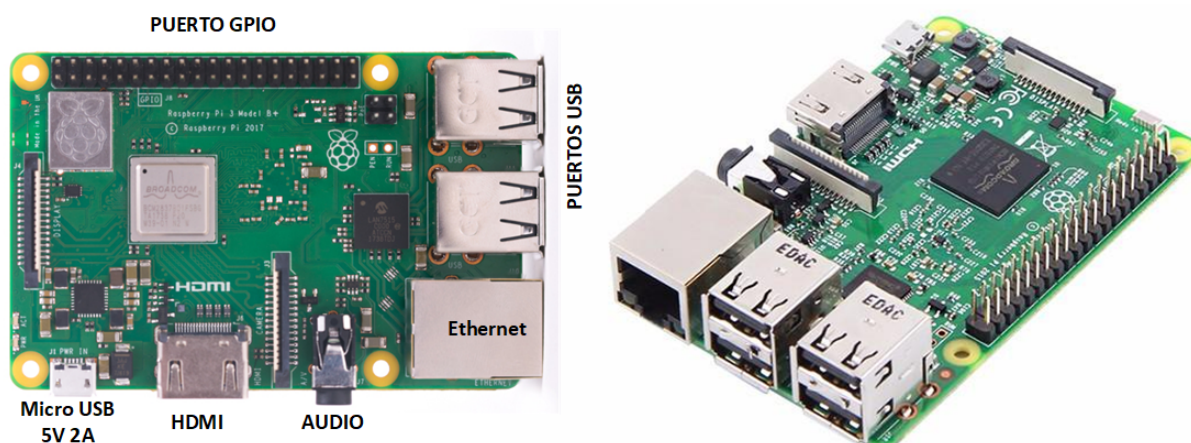
Con el objeto de poder acceder a este tipo de lecturas y tras acceder a diferentes edificios existentes en los que se dispone ya de contadores M-Bus, se concluye la necesidad de efectuar un diseño hardware para la adquisición y almacenaje de lecturas con el fin de poder ser utilizados para su análisis.

### 3.1.5.1 DISEÑO HARDWARE

Como hardware de partida, se ha buscado un equipo para elaboración de prototipos, de bajo coste, fácil de implementar, y con recursos suficientes como para poder almacenar el volumen de información a tratar. (datos de múltiples contadores) [34] [35] [36].

El hardware seleccionado es una placa “Raspberry Pi”. La raspberry pi fue desarrollada por la “Raspberry Pi Foundation” [37] en Inglaterra, y se comercializa desde el año 2012 con el objetivo de promocionar la informática en los centros de educación, convirtiéndose desde entonces en un estándar, que ha sido el pilar del desarrollo y elaboración de ininidad de proyectos y prototipos para investigación.

Desde el año 2016 se cuenta con el hardware de la versión 3, que dispone de conectividad WI-FI, Ethernet, Bluetooth e ininidad de posibilidades gracias a un puerto GPIO<sup>12</sup>. Esta es la versión que se ha utilizado en la implementación de los diferentes prototipos para la adquisición de datos en los emplazamientos que han sido estudiados [38] [39].



**Figura 12. Raspberry Pi 3. Model B. utilizada como soporte hardware para la adquisición de datos.**

<sup>12</sup> GPIO. General Purpose Input/Output.



El hardware de la raspberry pi, deberá protegerse para su instalación en cuadro eléctrico, buscando una envolvente adecuada que garantice al menos una estanqueidad mínima que evite contactos directos o indirectos en las operaciones de mantenimiento convencionales de las salas de calderas. En concreto se opta por una envolvente tipo Phoenix Contact diseñado según DIN 43880, son apilables y pueden fijarse sobre carril normalizado tipo DIN o directamente en la pared, pudiendo fácilmente poder ser instaladas sin proporcionar perturbaciones al correcto funcionamiento de las instalaciones.



**Figura 13. Vista del prototipo de medición encapsulado en caja tipo Phoenix para carril DIN.**

Al hardware de la raspberry, le deberemos añadir la posibilidad de comunicación M-Bus [40] [41] [42] [43]. La mayor parte de los maestros M-Bus, disponen de comunicación serie RS-232 o bien RS-485 [44]. Por este motivo es imprescindible disponer de puerto serie o USB libre en la raspberry pi, con el que poder establecer comunicación con el maestro M-Bus y así acceder a la red de contadores del edificio [45] [46] [47] [48].



**Figura 14. Maestro M-Bus utilizado para leer la red de contadores.**

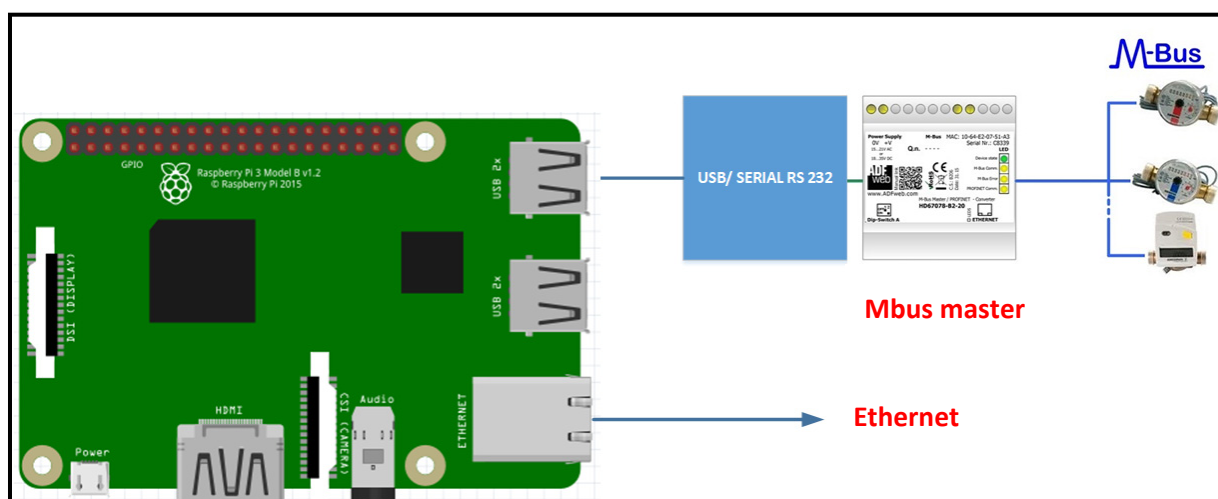
En este caso podemos disponer de dos opciones de comunicación. Un maestro M-Bus con comunicación serie tipo RS-232, o bien un maestro M-Bus [49] [50] con comunicación TCP-IP. La mayor parte de las salas de calderas que disponen de algún maestro M-Bus, lo tienen con comunicación serie RS-232, por lo que se opta por esta opción [51] [52] [53].

El hardware de la raspberry pi 3, no dispone de puerto serie, por lo que es preciso incorporarle un puerto RS-232 mediante comunicación compatible USB. Se opta por un equipo “DIGITUS USB 2.0 serial adapter” que dispone de chip FTDI / FT232RL con driver compatible para todos los sistemas operativos, entre ellos el utilizado por la raspberry pi [54] [55] [56].



**Figura 15. Conversor RS232-USB para la comunicación con Maestro M-Bus.**

Finalmente ya se dispone del hardware completo para la lectura de diferentes contadores de energía, quedando tal y como se muestra en la Figura 16. Esquema Hardware utilizado para la adquisición de datos.



**Figura 16. Esquema Hardware utilizado para la adquisición de datos.**

### 3.1.5.2 DISEÑO SOFTWARE

Partiendo del hardware anterior, ya se dispone de los equipos necesarios para establecer comunicación con la red de contadores de un edificio, pero ahora deberemos implementar un software capaz de gestionar la comunicación M-Bus, leer a una determinada frecuencia los contadores y finalmente almacenar esta información para su posterior análisis.

Para el diseño software hubo que determinar:

- Sistema operativo a emplear.

- Librerías de comunicación.
- Base de datos.
- Lenguaje de programación.
- Interface de comunicación.

El software implementado en la raspberry pi, parte de seleccionar en una primera instancia el **sistema operativo**, escogiendo Raspbian que viene a ser una implementación en Raspberry de la distribución Linux más utilizada: “Debian” [57]. Además de ser uno de los sistemas operativos más utilizados en el mundo, es software libre y dispone de multitud de soporte “open source” que nos facilitará la instalación e incluso compilación de todo el software necesario para nuestro proceso de monitorización [58] [59] .

De la evolución de Raspbian el sistema operativo instalado corresponde a la versión Jessie (Debian versión 8.0), posteriormente ha sido modificada a la versión Stretch y recientemente a la denominada Buster (Versión 10). Sin embargo, en los dispositivos utilizados se ha mantenido la versión Jessie [60], dado que son equipos aislados y sin exposición directa a internet no deben presentar problemas de seguridad en caso de no ser actualizados [61] [62] .

En este sistema operativo se han tenido que incorporar **librerías de comunicación** y drivers para la utilización de puerto serie, y una librería para poder acceder a comunicarnos mediante el protocolo M-Bus. [41] Para este cometido se utiliza la librería de código abierto “libmbus”<sup>13</sup> desarrollada y mantenida por la empresa sueca Raditex Control AB [63] .

La librería se encuentra programada y con código fuente disponible en lenguaje C, sirve para comunicar con esclavos (contadores) M-bus a través del protocolo M-bus cableado.

Incorpora aplicaciones simples pre compiladas para el escaneado de la red, lectura de contadores, presentación de los datos de cada contador en formato XML, simplificando el futuro tratamiento de la información. La librería nos permite además del uso del puerto serie, comunicación a través del protocolo de internet TCP/IP, pudiendo acceder a cualquier equipo maestro Mbus del mercado que nos encontremos en las instalaciones a monitorizar. Se trata de herramientas “shell” que son manejadas desde línea de comandos Linux. A modo de ejemplo puede observarse el resultado de escanear una red Mbus, a la velocidad de 2400 baudios, por puerto USB 0 con el comando:

```
mbus-serial-scan -b 2400 /dev/ttyUSB0
```

---

<sup>13</sup> Código fuente del proyecto: <https://github.com/rscada/libmbus>

```

root@raspberrypi:/home/pi# mbus-serial-scan -b 2400 /dev/ttyUSB0
Collision at address 0
Found a M-Bus device at address 1
Found a M-Bus device at address 2
Found a M-Bus device at address 3
Found a M-Bus device at address 4
Found a M-Bus device at address 5
Found a M-Bus device at address 6
Found a M-Bus device at address 7
Found a M-Bus device at address 8
Found a M-Bus device at address 9
Found a M-Bus device at address 10

```

Figura 17. Ejemplo de resultado al escanear red mbus a 2400 baudios por el puerto USB0.

Si se desea leer el contador con dirección 32, el comando a enviar será:

**mbus-serial-request-data -b 2400 /dev/ttyUSB0 32**

```

root@raspberrypi:/home/pi# mbus-serial-request-data -b 2400 /dev/ttyUSB0 32
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<MbusData>

  <SlaveInformation>
    <Id>54586031</Id>
    <Manufacturer>EFE</Manufacturer>
    <Version>0</Version>
    <ProductName>Engelmann / Elster SensoStar 2</ProductName>
    <Medium>Heat; Outlet</Medium>
    <AccessNumber>192</AccessNumber>
    <Status>27</Status>
    <Signature>0000</Signature>
  </SlaveInformation>

  <DataRecord id="0">
    <Function>Instantaneous value</Function>
    <StorageNumber>0</StorageNumber>
    <Unit>Fabrication number</Unit>
    <Value>54586031</Value>
    <Timestamp>2020-09-26T18:53:29</Timestamp>
  </DataRecord>

  <DataRecord id="1">
    <Function>Instantaneous value</Function>
    <StorageNumber>0</StorageNumber>
    <Unit>Time Point (time & date)</Unit>
    <Value>2020-09-26T16:48:00</Value>
    <Timestamp>2020-09-26T18:53:29</Timestamp>
  </DataRecord>

  <DataRecord id="2">
    <Function>Instantaneous value</Function>
    <StorageNumber>0</StorageNumber>
    <Unit>Volume (1e-1 m^3)</Unit>
    <Value>7543</Value>
    <Timestamp>2020-09-26T18:53:29</Timestamp>
  </DataRecord>

  <DataRecord id="3">
    <Function>Instantaneous value</Function>
    <StorageNumber>1</StorageNumber>
    <Unit>Volume (1e-1 m^3)</Unit>
    <Value>6672</Value>
    <Timestamp>2020-09-26T18:53:29</Timestamp>
  </DataRecord>

```

Figura 18. Ejemplo de valor XML de lectura del contador nº 32 por Mbus a la velocidad de 2400 baudios.

Nuestro prototipo ya dispone por lo tanto de herramientas para comunicarnos mediante línea de comandos, acceder a un escaneado o lectura de contadores, si bien, es preciso contar con lugar donde poder almacenar los datos obtenidos. Para esta actividad deberá contarse con una **base de datos**.



Una de las funcionalidades extra que nos proporcionará phpMyAdmin, [67] es la de disponer de una exportación de datos en formato CVS o similar para su tratamiento posterior con Microsoft © Excel.

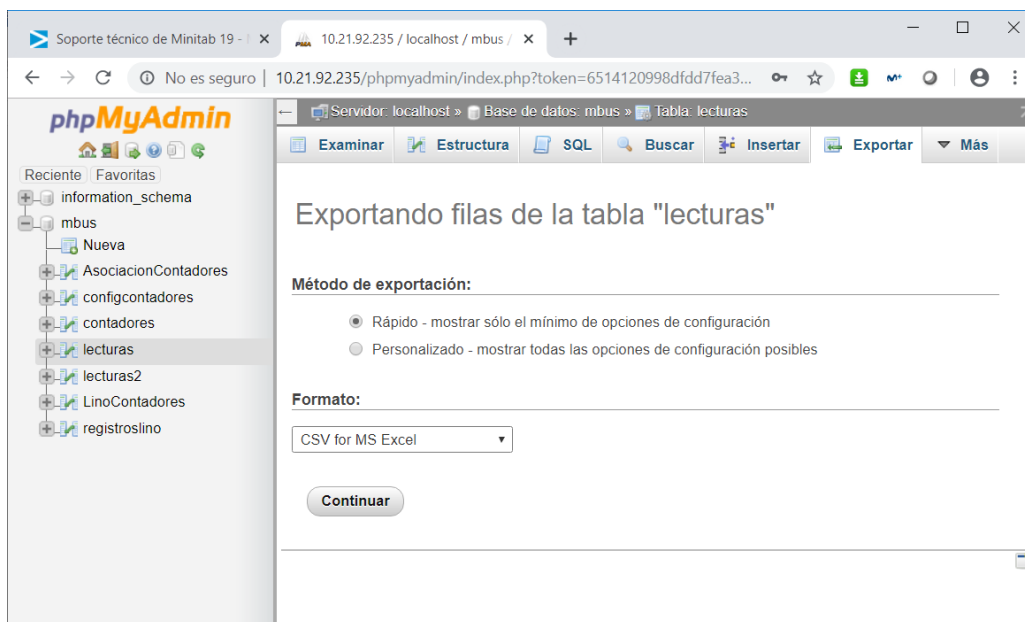


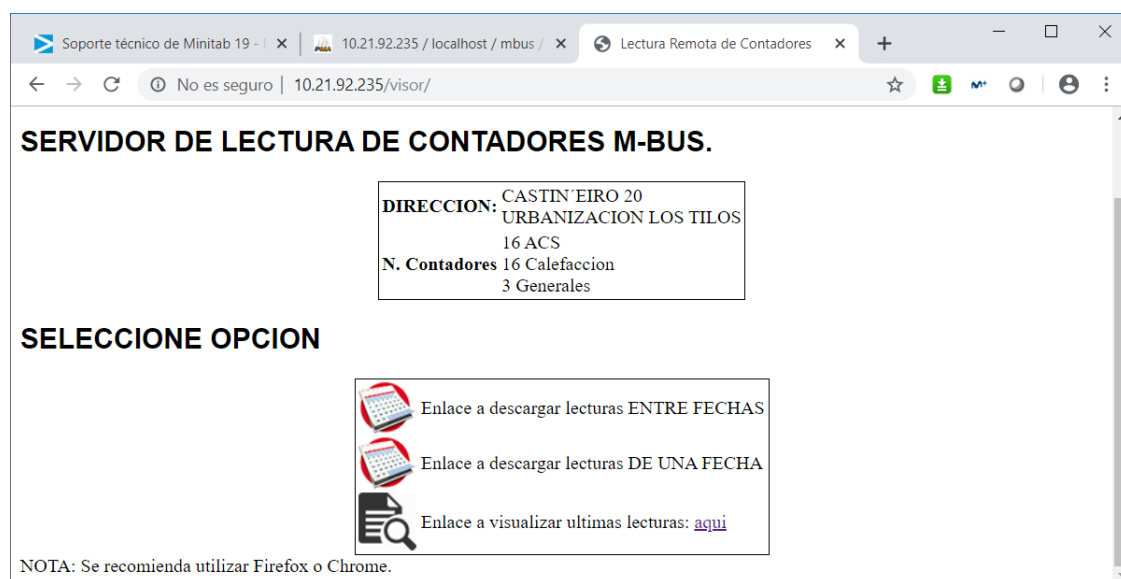
Figura 20. Imagen de la herramienta phpMyAdmin en la exportación de datos a MS Excel.

El prototipo finalmente deberá disponer de una pequeña interface web donde poder visualizar y consultar los datos almacenados, por lo que se diseña una pequeña aplicación web capaz de comunicarse con la base de datos, y ejecutar ordenes shell en Linux [68]. Se decide programar dicha aplicación en **lenguaje PHP** (Hypertext Pre-Processor), por ser un lenguaje de programación de código abierto muy utilizado en el desarrollo web y que puede ser incrustado en medio del código HTM, haciendo que podamos visualizar y consultar datos mediante **interface web** de forma fácil y sencilla.

La aplicación desarrollada finalmente dispone de una página principal, desde la que podemos acceder a 3 posibles enlaces:

- Visualizar lecturas entre 2 fechas (Inicio y Final).
- Visualizar la lectura de una fecha determinada.
- Visualizar últimas lecturas.

En la Figura 21, se muestra una imagen del resultado de esta aplicación. El código fuente está disponible como adjunto en el ANEXO 7.1.



**Figura 21. Pantalla principal de la aplicación web desarrollada en el prototipo.**

El resultado por lo tanto presenta una aplicación que bajo el sistema operativo dispone por una parte de un script que se ejecuta automáticamente todos los días a las 00:00h, procede a leer cada contador, almacenando su lectura en la base de datos. Por otro lado, se dispone de la interface web para acceder a las lecturas almacenadas e incluso filtrar fechas. Se puede generar una descarga masiva de datos directamente desde MySQL, exportando esta información para su tratamiento con hoja de cálculo o similar.

### 3.2 MÉTODOS

A continuación, se procede a la descripción de los diferentes métodos utilizados para la **recopilación de datos**, su clasificación por tipología de **instalaciones**, la generación de **datos aleatorios de entrada** para la obtención de múltiples certificaciones energéticas, el tratamiento de datos mediante **método de Montecarlo**, la generación de **superficies de respuesta** para obtención de modelos y su posterior optimización numérica.

#### 3.2.1 OBTENCIÓN DE DATOS EN EDIFICIOS EXISTENTES

Se comienza el estudio del impacto de las medidas de eficiencia energética aplicadas en diversos edificios del norte de Galicia, aprovechando la colaboración con un estudio de ingeniería que proyecta y dirige obras de adecuación y optimización energética en edificios residenciales, terciario e industrial. Esta empresa nos proporciona acceso a diversas instalaciones en las que poder incorporar el prototipo de medida y monitorización de consumos, también se les ha solicitado información disponible relativa a los consumos y costes energéticos de cada instalación previa a la realización de las obras de mejora y optimización energética en los citados edificios.

Entre la información a recopilar dispondremos en muchos casos de:


- Información previa del edificio. (Consumos, certificación energética inicial y final).
- Actuaciones realizadas. (Obras, equipos, rendimientos...).
- Proyecto de Ejecución de las actuaciones. (Esquema de principio del diseño).
- Importe de ejecución material de las obras.
- Acceso a la monitorización de los datos de consumo.

La relación de edificios finalmente monitorizados es la recogida en la Tabla 2, y cuya distribución geográfica corresponde a la Figura 22 .

**Tabla 2. Relación de edificios analizados y tipología a la que pertenecen**

TIPOLOGÍA	NOMBRE	UBICACIÓN
<b>Tipo 1</b> 	Edificio 1: Urbanización Los Tilos.	Santiago de Compostela.
	Edificio 2: Edificio de 24 viviendas	Puentedeume. La Coruña.
	Edificio 5: Edificio de 66 viviendas	La Coruña.



		Edificio 6: Residencial en la costa de Lugo	Viveiro. Lugo.
Tipo 2	<p><b>TIPO 2:</b> EDIFICIOS RENOVADOS + DOMÓTICA</p> 	Edificio 3: Urbanización tipo District Heating	Lugo
		Edificio 4: District Heating de 112 viviendas	La Coruña.
		Edificio 7: Edificio residencial de 76 viviendas	La Coruña.

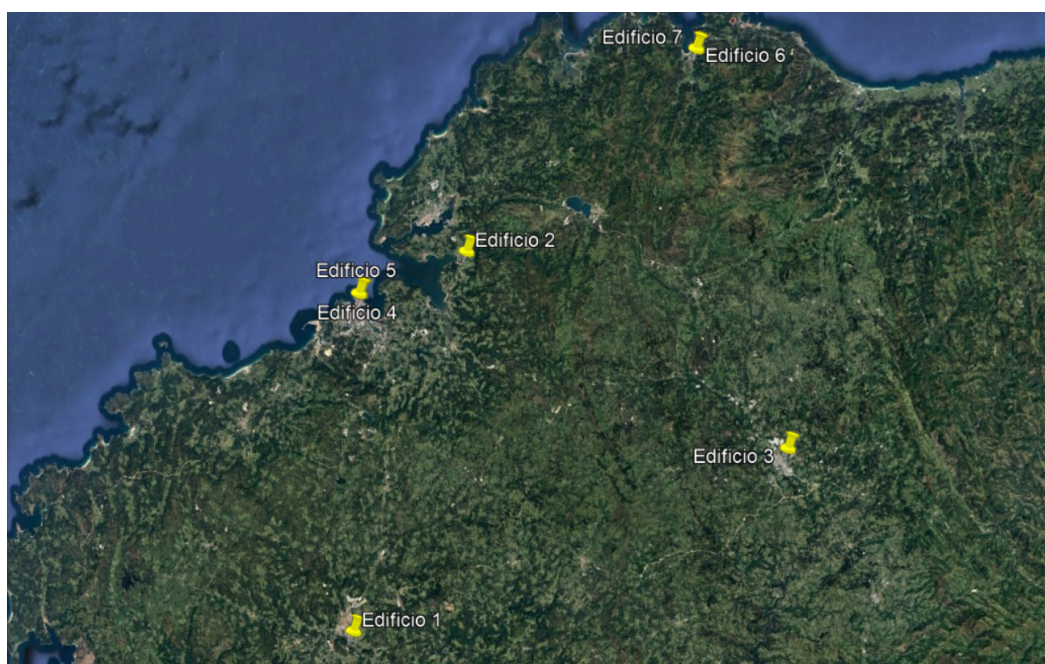


Figura 22. Distribución geográfica de los edificios analizados.

Con la documentación facilitada de diferentes instalaciones se comenzó realizando una clasificación entre instalaciones que realizaban un cambio de generación térmica (*ACS y calefacción*) que es la principal fuente de consumo energético de este tipo de edificios [69] [70]. La clasificación realizada distingue entre edificios **tipo 1**: edificios que renuevan su instalación térmica incorporando equipos nuevos y transformando combustible, y **tipo 2**: edificios que renuevan su instalación, pero además incorporan equipos de regulación y gestión técnica de las instalaciones adecuadas a la nueva tecnología.

- TIPO 1: CAMBIO DE COMBUSTIBLE Y/O TECNOLOGÍA.
- TIPO 2: CAMBIO DE COMBUSTIBLE Y/O TECNOLOGÍA + DOMÓTICA.



**Figura 23. Representación de las dos tipologías de edificios analizados: con y sin sistema de gestión técnica de las instalaciones (Domótica).**

A continuación se detallan ambas tipologías descritas en la Figura 23.

#### 3.2.1.1 EDIFICIOS TIPO 1

Esta primera tipología de edificios, corresponde a edificios de viviendas que disponen de una generación térmica convencional, basada en calderas estándar con combustible (normalmente) diésel y que **carecen de una regulación y control**, más allá de una regulación basada en termostato y consigna de temperatura.

La transformación de combustible recogida en cualquier herramienta de certificación energética, pasa por seleccionar el combustible original (*gasoil*) y el combustible final (*gas natural, por ejemplo*). También la herramienta solicita información sobre la tecnología original (*estándar, baja temperatura, o condensación*), y solicita la misma información para el combustible final (*normalmente condensación*).

El rendimiento estacional anual de una caldera moderna de condensación a gas natural es superior al de una estándar de gasoil. Sin embargo, el diseño, y el control de la regulación de la instalación, debería ajustarse a esta nueva tecnología, intentando evitar trabajar por encima de la temperatura de condensación del gas natural (61 °C), y así poder aprovechar el calor latente disponible y que permite acceder a estas calderas al PCS (*poder calorífico superior*) del combustible.

En los edificios seleccionados, a partir de la documentación técnica facilitada, se observa que, en su esquema de principio, **mantienen el diseño** y en gran medida la ausencia de una regulación electrónica (domótica) asociada que permita obtener ese alto rendimiento derivado la de condensación. Trabajan en la producción de agua caliente sanitaria a muy alta temperatura (80°C) haciendo que la totalidad del año, esa producción sea realizada sin la posibilidad de condensar, por lo tanto, comportándose como una caldera estándar a 80°C, e impidiendo a la caldera acceder al PCS del combustible.

### 3.2.1.2 EDIFICIOS TIPO 2

Esta segunda tipología de edificios, corresponde a edificios de viviendas que, tras su transformación y adecuación, han incorporado **tecnología de condensación**, adecuando el **diseño hidráulico**, e **incorporando una regulación y una gestión y control**, acorde a esa nueva tecnología.

A modo de ejemplo, en este grupo tenemos edificios cuyo esquema de principio, ya **no dispone de agua caliente sanitaria almacenada** como tal, evitando la necesidad de almacenarla por encima de los 60 °C <sup>16</sup> y, por lo tanto, necesitando que los generadores proporcionen temperaturas de 70 – 80 °C para su calentamiento. La regulación domótica también actúa en la modulación del caudal hidráulico.

El rendimiento estacional anual de una caldera moderna de condensación a gas natural es superior al de una estándar de gasoil. Sin embargo, el diseño, y el control de la regulación de la instalación, debería ajustarse a esta nueva tecnología, intentando evitar trabajar por encima de la temperatura de condensación del gas natural (61 °C), y así poder aprovechar el calor latente disponible y que permite acceder a estas calderas al PCS (*poder calorífico superior*) del combustible.

A continuación, en los apartados siguientes, se listan los diferentes edificios con los datos más relevantes de cada uno de ellos para el desarrollo de este estudio.

En cada uno de ellos, además de la documentación técnica y de consumos solicitada, se ha instalado el prototipo desarrollado para la adquisición de datos, con el fin de poder analizar posteriormente los resultados.

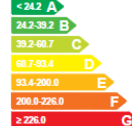
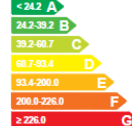
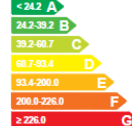
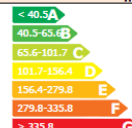
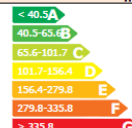
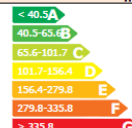
---

<sup>16</sup> El Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis, obligando a disponer de agua acumulada a temperatura mínima de 60°C

## 3.2.1.3 EDIFICIO 1: URBANIZACIÓN LOS TILOS. SANTIAGO DE COMPOSTELA



Figura 24. Edificio 1: Vista General del edificio objeto de estudio.

Urbanización los Tilos. Santiago de Compostela																																					
Sala de calderas	1 caldera a gasoil para servicio de calefacción, Ferroli Prex E20, 125.000 kcal, 145kW del año 1987 con un rendimiento según fabricante de $\mu=90\%$ Quemador Lamborghini																																				
Número de Plantas	Bajo + 3																																				
Número de Viviendas	16. Bajo, 1º, 2º y 3º -> A, B, C y D																																				
Consumo Inicial	13.000 litros año de gasoil. 133.640 kWh/año) + ACS individual 28.400kWh)																																				
Superficie m²	2.343																																				
Certificación Energética Inicial	<table><tr><th colspan="2">INDICADOR GLOBAL</th><th colspan="3">INDICADORES PARCIALES</th></tr><tr><td rowspan="5"></td><td rowspan="5">224.5 F</td><td colspan="2">CALEFACCIÓN</td><td colspan="2">ACS</td></tr><tr><td>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</td><td>E</td><td>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</td><td>G</td></tr><tr><td>173.41</td><td></td><td>51.04</td><td></td></tr><tr><td colspan="2">REFRIGERACIÓN</td><td colspan="2">ILUMINACIÓN</td></tr><tr><td>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</td><td>-</td><td>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</td><td>-</td></tr><tr><td colspan="2">Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]</td><td>0.00</td><td></td><td>-</td><td></td></tr></table>				INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES				224.5 F	CALEFACCIÓN		ACS		Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	Energía primaria ACS [kWh/m² año]	G	173.41		51.04		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN		Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-	Energía primaria iluminación [kWh/m² año]	-	Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		0.00		-	
INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES																																			
	224.5 F	CALEFACCIÓN		ACS																																	
		Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	Energía primaria ACS [kWh/m² año]	G																																
		173.41		51.04																																	
		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN																																	
		Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-	Energía primaria iluminación [kWh/m² año]	-																																
Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		0.00		-																																	
Certificación Energética Final	<table><tr><th colspan="2">INDICADOR GLOBAL</th><th colspan="3">INDICADORES PARCIALES</th></tr><tr><td rowspan="5"></td><td rowspan="5">160.51 E</td><td colspan="2">CALEFACCIÓN</td><td colspan="2">ACS</td></tr><tr><td>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</td><td>E</td><td>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</td><td>D</td></tr><tr><td>140.69</td><td></td><td>19.82</td><td></td></tr><tr><td colspan="2">REFRIGERACIÓN</td><td colspan="2">ILUMINACIÓN</td></tr><tr><td>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</td><td>-</td><td>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</td><td>-</td></tr><tr><td colspan="2">Consumo global de energía primaria [kWh/m² año]</td><td>0.00</td><td></td><td>-</td><td></td></tr></table>				INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES				160.51 E	CALEFACCIÓN		ACS		Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	Energía primaria ACS [kWh/m² año]	D	140.69		19.82		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN		Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-	Energía primaria iluminación [kWh/m² año]	-	Consumo global de energía primaria [kWh/m² año]		0.00		-	
INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES																																			
	160.51 E	CALEFACCIÓN		ACS																																	
		Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	Energía primaria ACS [kWh/m² año]	D																																
		140.69		19.82																																	
		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN																																	
		Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-	Energía primaria iluminación [kWh/m² año]	-																																
Consumo global de energía primaria [kWh/m² año]		0.00		-																																	
Consumo real observado Inicial	213.250,56 kWh/año de E.P. no renovable																																				
Consumo real observado final tras la reforma		Consumo real (kWh/año E.P.)	Variación respecto certificación	Variación respecto consumo inicial																																	
	Año 2017	117.755,43	-69%	-44,78%																																	
	Año 2018	149.017,89	-60%	-30,12%																																	
	Año 2019	138.049,52	-63%	-35,26%																																	



### Estado Actual:

La sala de calderas atiende al servicio de calefacción en exclusiva. Para el servicio de ACS, cada vivienda dispone de termos eléctricos individuales, tal y como se muestra en una de las fotografías de la Figura 25.



**Figura 25. Edificio 1. Fotografías del estado actual**

### Estado Reformado:

- Se le da acceso directo desde el exterior.
- Se incorpora servicio de ACS, dando ahora ambos servicios ACS y calefacción.
- Transformación de combustible a gas natural.
- Calderas de condensación en cascada BAXI modelo BIOS Plus 2x70 kW.
- Tanque interacumulador de producción de ACS con serpentín para trabajo a 80 °C.



**Figura 26 Edificio 1. Fotografías del estado reformado**

Para finalizar, se aprovecha para incorporar el prototipo de adquisición de datos para acceder a las lecturas de los contadores de energía y ACS con lectura Mbus.



**Figura 27. Edificio 1. La fotografía muestra prototipo de medición instalado.**

#### **Esquema de principio de la instalación reformada:**

La siguiente Figura 28 muestra el esquema de principio de la nueva instalación, en la que se identifican los 3 contadores de energía térmica general EM01, EM02, EM03, así como el esquema de generación de ACS que puede observarse que se realiza con un serpentín para trabajo a alta temperatura, impidiendo que las calderas trabajen a temperatura cercana a condensación.

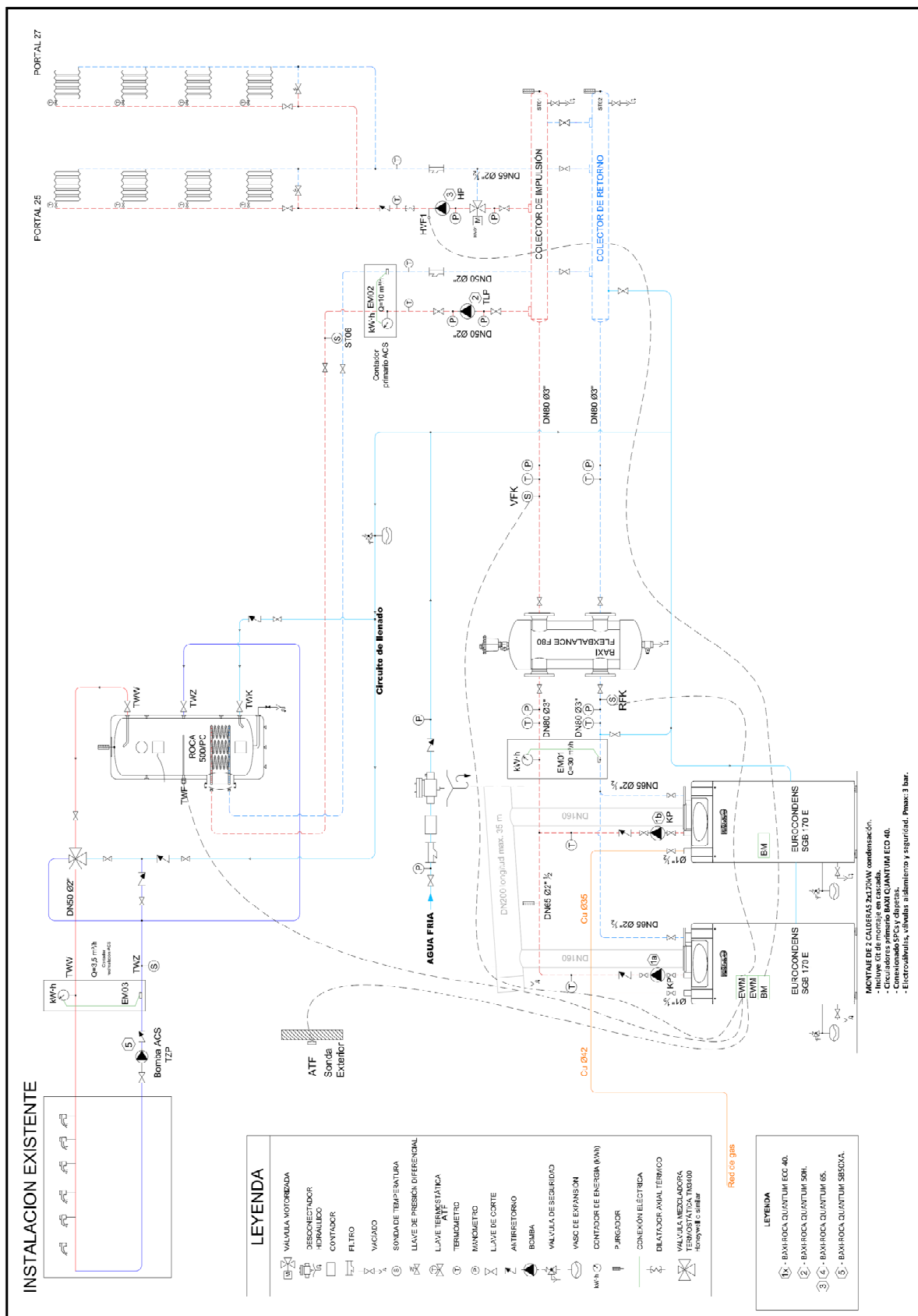


Figura 28. Edificio 1. Esquema de principio de la instalación reformada.

## 3.2.1.4 EDIFICIO 2: EDIFICIO 24 VIVIENDAS EN PUENTEDEUME. LA CORUÑA



Figura 29 Edificio 2: Vista General del edificio objeto de estudio

Edificio de 24 viviendas en Puente deume. La Coruña																																
Sala de calderas	Centralizada en Sala de Calderas situada a semisótano. La sala dispone de 2 calderas de gasoil ROCA TR3 de 430 kW del año 1972 con quemador TECNO 70L. (Calefacción) y una FERROLI SN-24-70 de 82 kW. (ACS)																															
Número de Plantas	Bajo + 5																															
Número de Viviendas	24																															
Consumo Real Inicial	24.500 litros/año ( 251.860 kWh/año).																															
Certificación Energética Inicial	<div><div><div><div>&lt;242 A</div><div>242-312 B</div><div>312-352 C</div><div>352-392 D</div><div>392-432 E</div><div>432-472 F</div><div>&gt;472 G</div></div><div>159.1 E</div></div><div><div>Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]</div></div></div> <table><tr><th colspan="2">INDICADOR GLOBAL</th><th colspan="2">INDICADORES PARCIALES</th></tr><tr><th colspan="2"></th><th>CALEFACCIÓN</th><th>ACS</th></tr><tr><td>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</td><td>E</td><td>117.99</td><td>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td>40.51</td></tr><tr><td colspan="2"></td><th>REFRIGERACIÓN</th><th>ILUMINACIÓN</th></tr><tr><td>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</td><td>-</td><td></td><td>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</td></tr><tr><td></td><td></td><td>0.64</td><td>-</td></tr></table>				INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES				CALEFACCIÓN	ACS	Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	117.99	Energía primaria ACS [kWh/m² año]				40.51			REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN	Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-		Energía primaria iluminación [kWh/m² año]			0.64	-
INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES																														
		CALEFACCIÓN	ACS																													
Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	117.99	Energía primaria ACS [kWh/m² año]																													
			40.51																													
		REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN																													
Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-		Energía primaria iluminación [kWh/m² año]																													
		0.64	-																													
Certificación Energética Final	<div><div><div><div>&lt;242 A</div><div>242-312 B</div><div>312-352 C</div><div>352-392 D</div><div>392-432 E</div><div>432-472 F</div><div>&gt;472 G</div></div><div>97.3 E</div></div><div><div>Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]</div></div></div> <table><tr><th colspan="2">INDICADOR GLOBAL</th><th colspan="2">INDICADORES PARCIALES</th></tr><tr><th colspan="2"></th><th>CALEFACCIÓN</th><th>ACS</th></tr><tr><td>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</td><td>D</td><td>74.74</td><td>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td>21.88</td></tr><tr><td colspan="2"></td><th>REFRIGERACIÓN</th><th>ILUMINACIÓN</th></tr><tr><td>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</td><td>-</td><td></td><td>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</td></tr><tr><td></td><td></td><td>0.64</td><td>-</td></tr></table>				INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES				CALEFACCIÓN	ACS	Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	D	74.74	Energía primaria ACS [kWh/m² año]				21.88			REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN	Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-		Energía primaria iluminación [kWh/m² año]			0.64	-
INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES																														
		CALEFACCIÓN	ACS																													
Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	D	74.74	Energía primaria ACS [kWh/m² año]																													
			21.88																													
		REFRIGERACIÓN	ILUMINACIÓN																													
Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-		Energía primaria iluminación [kWh/m² año]																													
		0.64	-																													
Consumo real observado Inicial	296.942,90 kWh/año de E.P. no renovable																															
Consumo real observado final tras la reforma		Consumo real (kWh/año E.P.)	Variación respecto certificación	Variación respecto consumo inicial																												
	Año 2017	210.029,88	-40%	-29,27%																												
	Año 2018	216.973,79	-38%	-26,93%																												
	Año 2019	196.555,17	-44%	-33,81%																												



### Estado Actual:

La sala de calderas atiende al servicio de calefacción y ACS. Dispone de un generador para cada servicio. El ACS se produce y acumula en un tanque marca ACV MODELO HR600 de 600 litros del que se proporciona servicio a las 24 viviendas.

El consumo medio inicial observado en los últimos años es de unos 24.500 litros de gasoil al año, lo que corresponde a 296.942,90 kWh/año de E.P. no renovable.



**Figura 30. Edificio 2. Fotografías del estado actual.**

### Estado Reformado:

- Transformación de combustible a gas natural
- Calderas de condensación marca BAXI modelo SGB Eurocondens 2x170 kW en cascada con regulación SIEMENS multilevel.
- La producción de ACS se realiza con tanque con serpentín para trabajo a 80 °C.



**Figura 31 Edificio 2. Fotografía del estado reformado.**

Los datos obtenidos de consumo en los últimos años responden a las lecturas observadas por el equipo de monitorización que ha registrado valores diarios de consumo general, ACS y calefacción. De los resultados extraídos concluyen unos consumos de energía térmica útil de:

**Tabla 3. Consumo registrado y obtenido del contador general de la sala del edificio Nº 2.**

<b>Año</b>	<b>Consumo Total (kWh/año)</b>	<b>Factor de Paso [71]</b>	<b>E. Primaria no renovable</b>
<b>2017</b>	143.491,00	1,19	200.887,40
<b>2018</b>	150.970,00	1,19	211.358,00
<b>2019</b>	134.120,00	1,19	187.768,00

El esquema de principio de la instalación es similar al del edificio anterior.



### 3.2.1.5 EDIFICIO 3: URBANIZACIÓN TIPO DISTRICT HEATING EN LUGO



Figura 32. Edificio 3: Vista General del edificio objeto de estudio

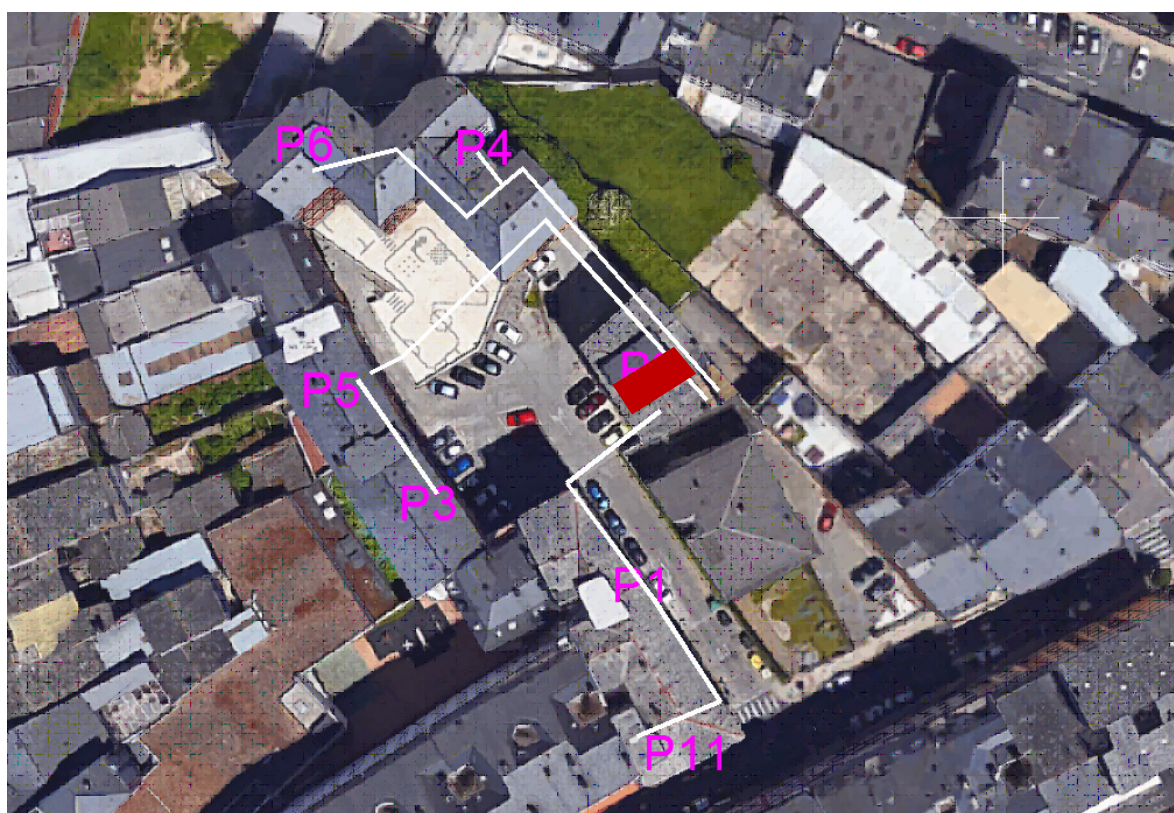


Figura 33. Edificio 3: Vista en planta de los diferentes edificios atendidos.

Urbanización tipo District Heating en Lugo.				
Sala de calderas	Suministro con 2 calderas gemelas (696 kW) con quemadores de Gasoil ROCA CPA 300 y quemador TECNO 44-L			
Número de Plantas	Bajo + 6			
Número de Viviendas	72 (20+16+8+28)			
Consumo Inicial	100.000 litros/año (1.028.000 kWh/año) solo calefacción. 167.525 kWh/año de electricidad para ACS <b>TOTAL: 1.539.355 kWh/año de EP no renovable.</b>			
Certificación Energética Inicial 2.804.414 kWh/año E. Primaria ( 231.385 litros/año de gasoil)	329.4 G	451.2 G	373.4 G	306.8 F
Certificación Energética Final 1.646.660,80 kWh/año E. Primaria (1.383.748 kWh/año de gas)	193.8 E	266.4 E	218.5 E	180 E
Consumo real observado Inicial	1.539.355 kWh/año de E.P. no renovable			
Consumo real observado final tras la reforma		Consumo real (kWh/año E.P.)	Variación respecto certificación	Variación respecto consumo inicial
	Año 2016	981.729,95	-40,38%	-36,22%
	Año 2017	994.825,88	-39,59%	-35,37%
	Año 2018	921.029,21	-44,07%	-40,17%
	Año 2019	862.966,10	-47,59%	-43,94%

**Estado Actual:**

El conjunto corresponde a una comunidad de propietarios que está distribuida en 4 edificios, por lo que la certificación energética global está formada por 4 certificaciones diferentes que comparten infraestructura térmica comunitaria (DISTRICT HEATING).

Para conocer el consumo estimado por la certificación inicial y final, se ha realizado la suma de los resultados de cada certificación, tal y como se muestra en la siguiente Tabla 4:

**Tabla 4. Distribución del consumo inicial de la certificación energética del district heating e Lugo.**

Edificio	Nº Viv.	Superficie m <sup>2</sup>	Consumo E. Primaria (kWh/m <sup>2</sup> año)	Consumo E. Primaria (kWh/año)
P1 y P11	20	2.175	329,4	716.445,00
P3 y P5	16	2.074	373,4	774.431,60
P2	8	787	451,2	355.094,40

P4 y P6	28	3.124	306,8	958.443,20
<b>TOTALES:</b>	<b>76</b>	<b>8.160</b>		<b>2.804.414,20</b>

Las viviendas tan solo disponen de servicio de calefacción comunitario (6 horas al día), siendo el ACS resuelto por cada vivienda, en su gran mayoría mediante termos eléctricos. Ante la imposibilidad de disponer de la energía real consumida, se estima que ésta ha sido la necesaria para calentar diariamente el ACS de las 72 viviendas.

De esta manera, y considerando la temperatura media mensual del AFCH en la ciudad de Lugo, tomada de los datos disponibles en el Anejo G Temperatura del agua de red, del documento básico HE, el factor de centralización obtenido del Anejo F del mismo documento, se procede a la estimación mensual de energía necesaria para la producción de ACS que queda recogida en la Tabla 5 y que asciende a 167.525 kWh/año .

**Tabla 5. Energía térmica necesaria para la producción de ACS del edificio Nº 3.**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.
Tª AFCH	7	8	9	10	11	13	15	15	14	12	9	8
Tª ACS	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Energía día (kWh)	495,77	486,42	477,06	467,71	458,35	439,64	420,94	420,94	430,29	449,00	477,06	486,42
Energía mes (kWh)	15.369	13.619	14.789	14.031	14.209	13.189	13.049	13.049	12.908	13.919	14.311	15.079

Considerando esta energía para la producción de ACS generada con termo eléctrico y utilizando los factores de conversión para energía eléctrica el consumo de energía primaria ascendería a 327.343 kWh/año. Esta energía sumada a la consumida para calefacción da un total de:

$$327.343 \text{ kWh/año de EP para ACS} + 1.028.000 \text{ kWh/año de gas} \times 1,179 = \mathbf{1.539.355,85 \text{ kWh/año de E.P.}}$$





**Figura 34. Edificio 3. Fotografías del estado actual.**

#### **Estado Reformado:**

Se modifica la sala de calderas por medio de la transformación de combustible a gas natural y calderas de condensación BAXI SGB Eurocondens 2x400 kW en cascada con regulación SIEMENS multilevel. El diseño se ha optimizado para trabajar en condensación, se ha incorporado producción de ACS que anteriormente estaba resuelta de forma individual mediante termos eléctricos. Finalmente se ha instalado un tanque de inercia de 1500 litros y se distribuye **un solo colector** para ambos servicios de calefacción y ACS.

La producción de ACS se realiza de forma instantánea en las viviendas que lo desean, mediante intercambiador de placas para producción instantánea, recogiendo el consumo del ACS en el mismo contador de energía que el consumo de calefacción.

El servicio de calefacción está disponible ahora 24 h / 365 días al año. A pesar de ello, el equipo de monitorización registró los siguientes consumos en los últimos años indicados en la Tabla 6, que nos permiten confirmar que a pesar de aumentar las horas de servicio, se ha conseguido un ahorro superior al 30% respecto al consumo real inicial.

**Tabla 6. Consumo anual obtenido del contador de energía general del edificio Nº 3.**

AÑO	LECTURA CONTADOR GRL (kWh)	CONSUMO ENERGÍA TÉRMICA (kWh/año)
2016	47.100	734.400
2017	781.500	761.000
2018	1.542.500	694.100
2019	2.236.600	658.900
2020	2.895.500	

**Figura 35 Edificio 3. Fotografía del estado reformado de la sala.****Esquema de principio de la instalación reformada:**

La siguiente Figura 36 muestra el esquema de principio de la nueva instalación, en la que se identifica solo un contador de energía térmica general EM01 ya que en vivienda se dispone de un contador de energía individual y la diferencia entre la energía registrada en viviendas y la generada en sala corresponden a las pérdidas por transporte.

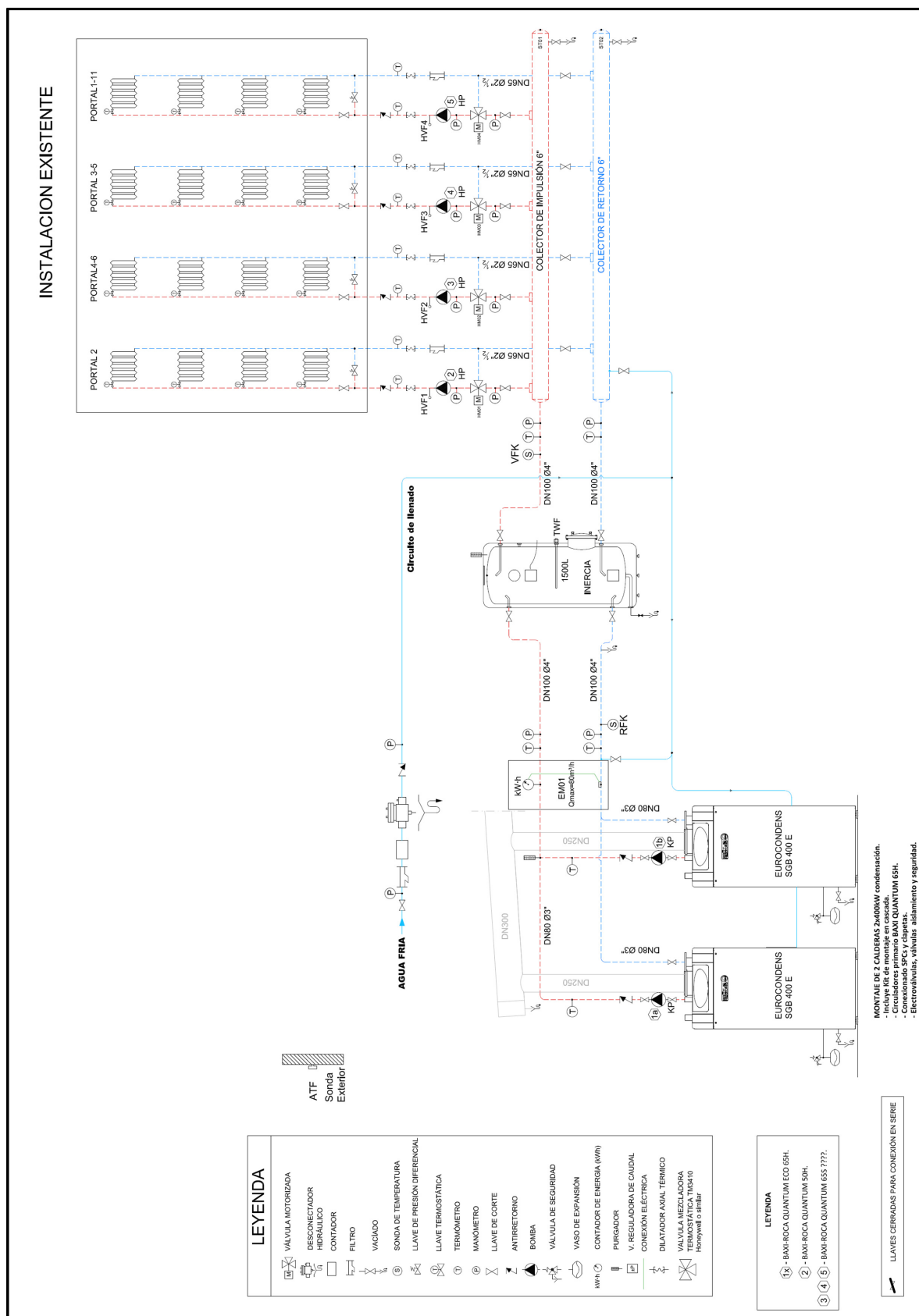


Figura 36. Edificio 3. Esquema de principio de la instalación reformada.



### 3.2.1.6 EDIFICIO 4: DISTRICT HEATING DE 112 VIVIENDAS EN LA CORUÑA

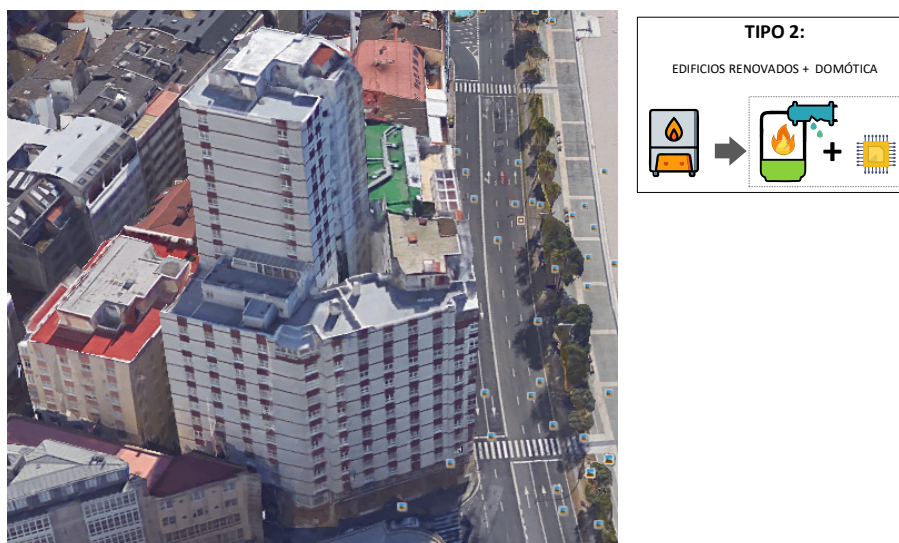



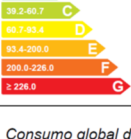
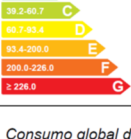
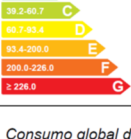


Figura 37. Edificio 4: Vista General de ambos edificios objeto de estudio.

District Heating de 112 viviendas en La Coruña																																				
Sala de calderas	Suministro con 2 calderas a gas ROCA CPA 1100 de 1280 kW del año 2.000. con quemador TECNO 130 GM y una ROCA CPA 400 de 464 kW del año 1.999. Con quemador Lamborghini.																																			
Número de Plantas	Bajo + 21																																			
Número de Viviendas	112																																			
Consumo Inicial	Media anual de 1.600.000 kWh/año de gas. (1.886.400 kWh/año E.P.)																																			
Certificación Energética Inicial 2.235.043,30 kWh/año E. Primaria 1.895.711,03 kWh/año Comb. Gas.	<table><tr><th colspan="2">INDICADOR GLOBAL</th><th colspan="3">INDICADORES PARCIALES</th></tr><tr><td rowspan="5"></td><td rowspan="5">219,1 F</td><td colspan="2">CALEFACCIÓN</td><td>ACS</td></tr><tr><td>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</td><td>E</td><td>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</td><td>G</td></tr><tr><td>176.88</td><td></td><td>41.84</td><td></td></tr><tr><td colspan="2">REFRIGERACIÓN</td><td colspan="2">ILUMINACIÓN</td></tr><tr><td>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</td><td>-</td><td>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</td><td>-</td></tr><tr><td colspan="2">Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]</td><td>0.38</td><td></td><td>-</td><td></td></tr></table>				INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES				219,1 F	CALEFACCIÓN		ACS	Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	Energía primaria ACS [kWh/m² año]	G	176.88		41.84		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN		Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-	Energía primaria iluminación [kWh/m² año]	-	Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		0.38		-	
INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES																																		
	219,1 F	CALEFACCIÓN		ACS																																
		Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	Energía primaria ACS [kWh/m² año]	G																															
		176.88		41.84																																
		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN																																
		Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-	Energía primaria iluminación [kWh/m² año]	-																															
Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		0.38		-																																
Certificación Energética Final 1.550.246,00 kWh/año E. Primaria 1.314.882,10 kWh/año Comb. Gas	<table><tr><th colspan="2">INDICADOR GLOBAL</th><th colspan="3">INDICADORES PARCIALES</th></tr><tr><td rowspan="5"></td><td rowspan="5">145,4 E</td><td colspan="2">CALEFACCIÓN</td><td>ACS</td></tr><tr><td>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</td><td>E</td><td>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</td><td>G</td></tr><tr><td>121.65</td><td></td><td>23.52</td><td></td></tr><tr><td colspan="2">REFRIGERACIÓN</td><td colspan="2">ILUMINACIÓN</td></tr><tr><td>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</td><td>-</td><td>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</td><td>-</td></tr><tr><td colspan="2">Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]</td><td>0.24</td><td></td><td>-</td><td></td></tr></table>				INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES				145,4 E	CALEFACCIÓN		ACS	Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	Energía primaria ACS [kWh/m² año]	G	121.65		23.52		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN		Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-	Energía primaria iluminación [kWh/m² año]	-	Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		0.24		-	
INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES																																		
	145,4 E	CALEFACCIÓN		ACS																																
		Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	Energía primaria ACS [kWh/m² año]	G																															
		121.65		23.52																																
		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN																																
		Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-	Energía primaria iluminación [kWh/m² año]	-																															
Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		0.24		-																																
Consumo real observado Inicial	1.886.400 kWh/año de E.P. no renovable																																			
Consumo real observado final tras la reforma		Consumo real (kWh/año E.P.)	Variación respecto certificación	Variación respecto consumo inicial																																
	Año 2018	871.904,85	-53,78%	-43,76%																																
	Año 2019	910.317,02	-51,74%	-41,28%																																
	Año 2020	948.761,08	-49,71%	-38,80%																																

### Estado Actual



**Figura 38. Edificio 4. Fotografías del estado actual.**

La sala alimenta a dos torres, una de ellas con 21 plantas de altura tal y como se muestra en la Figura 39. La otra más baja tan solo tiene 7 alturas. Ambas propiedades comparten la generación térmica.



**Figura 39 Edificio 4: Estructura del edificio y ubicación de la sala de calderas.**

#### **Estado Reformado:**

- Adecuación total de la generación mediante instalación de calderas de condensación a gas, marca BAXI modelo SGB 520 kW.
- Esquema para trabajo a baja temperatura.
- Producción instantánea de ACS mediante inercia de 4.500 litros.



**Figura 40. Edificio 3. Fotografía del estado reformado.**

#### **Esquema de principio de la instalación reformada:**

Se muestran los 2 contadores de energía térmica general EM02, EM03, y los utilizados para conocer la energía destinada a generación de ACS EM07, EM08, EM09.

La generación está optimizada para producción a baja temperatura, manteniendo el tanque de inercia a la temperatura mínima de 56 °C. De este modo, se garantiza la condensación de las calderas la mayor parte del año.

La regulación solo sube a alta temperatura cuando se dispone de temperaturas exterior muy bajas, con el fin de compensar las pérdidas de calefacción.

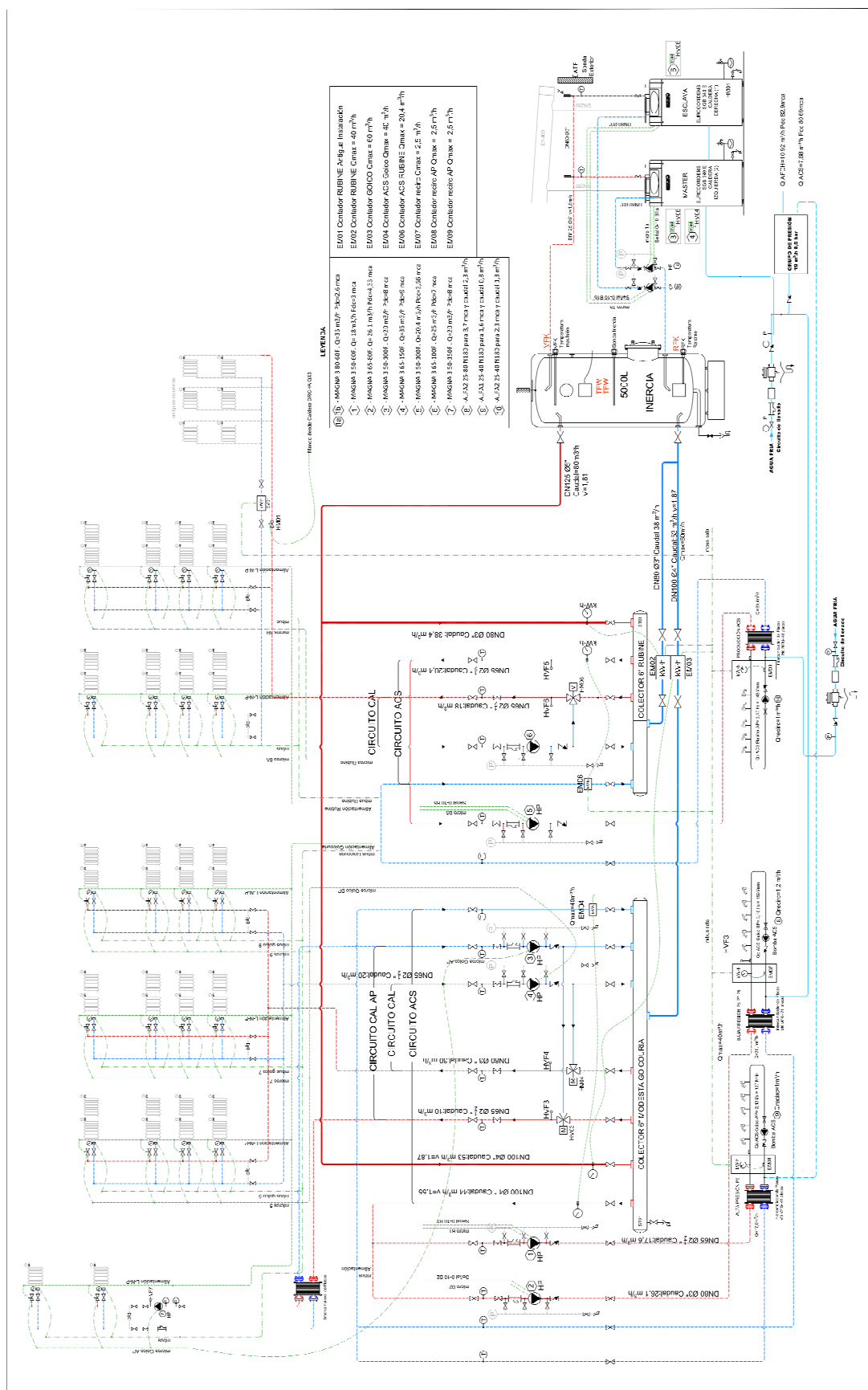


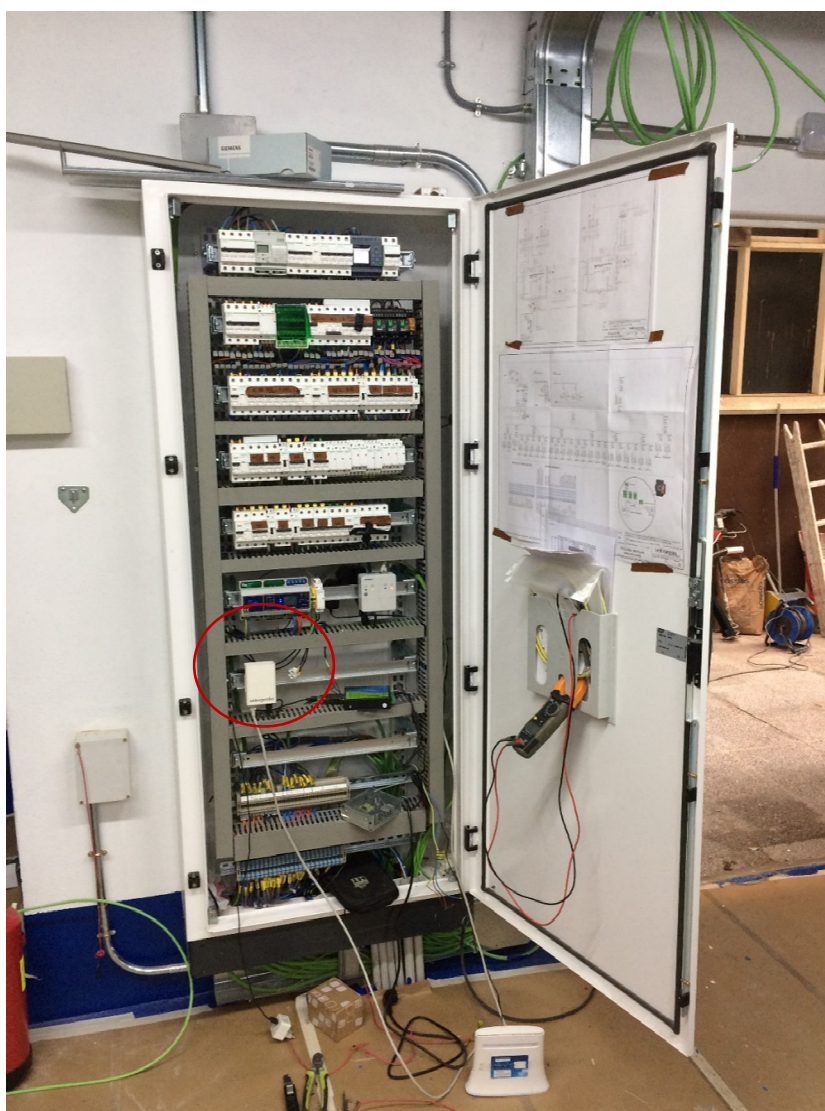
Figura 41. Edificio 4. Esquema de principio de la instalación reformada.



Tras la puesta en marcha de la instalación en el año 2017, los consumos generales observados por la instalación, medidos en los contadores de energía son los de la Tabla 7. Los consumos son monitorizados gracias a la instalación del equipo de monitorización tal y como puede observarse en la Figura 42.

**Tabla 7. Consumos obtenidos del edificio Nº 4 y Energía Primaria no renovable**

AÑO	General 1	General 2	Total (kWh/año)	E. Primaria No renovable
2018	503.080,00	184.830,00	687.910,00	880.039,67
2019	493.640,00	217.550,00	711.190,00	918.810,23
2020	505.830,00	232.900,00	738.730,00	957.612,96



**Figura 42. Edificio 4. Colocación del prototipo de monitorización de energía en el edificio Nº 4.**

### 3.2.1.7 EDIFICIO 5: EDIFICIO DE 66 VIVIENDAS EN LA CORUÑA

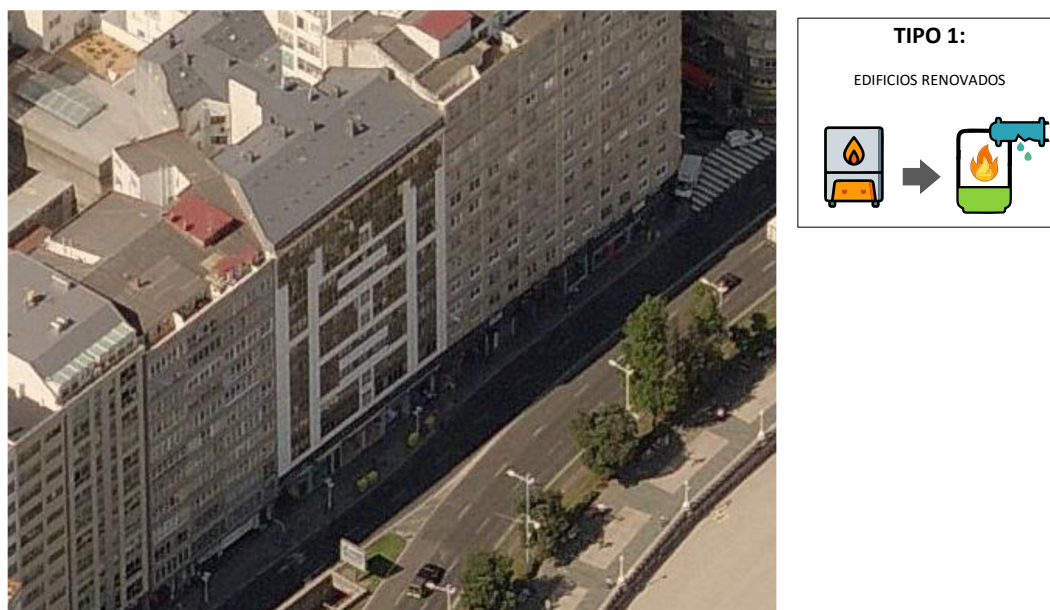


Figura 43. Edificio 5: Vista General del edificio objeto de estudio 66 viviendas entre medianeras.

EDIFICIO DE 66 VIVIENDAS EN LA CORUÑA				
Sala de calderas	Suministro con 2 calderas a gasoil: <div><div>- caldera FERROLI AGS 01 130 - 150 kW para ACS. y quemador ELCO ELO3B20 (Año 1973)</div><div>- caldera FERROLI AGS 01 410 - 475 kW para calefacción y quemador ELCO KLOCKNER (Año 1973)</div></div>			
Número de Plantas	Bajo + 12			
Número de Viviendas	66			
Superficie m²	5.465			
Consumo Inicial	23.000 litros / año (278.762 kWp/año E.P.)			
Certificación Energética Inicial	<div><div><div><div><div><div>&lt; 24,2</div><div>A</div></div><div><div>24,2-39,2</div><div>B</div></div><div><div>39,2-49,7</div><div>C</div></div><div><div>49,7-59,4</div><div>D</div></div><div><div>59,4-69,4</div><div>E</div></div><div><div>69,4-80,0</div><div>F</div></div><div><div>≥ 80,0</div><div>G</div></div></div><div></div><div>244,5 G</div></div><div><div><div>Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]</div><div></div></div><div><div>CALEFACCIÓN</div><div>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</div><div>204,11</div></div><div><div>ACS</div><div>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</div><div>40,34</div></div><div><div>REFRIGERACIÓN</div><div>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</div><div>-</div></div><div><div>ILUMINACIÓN</div><div>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</div><div>-</div></div></div></div></div>			
Certificación Energética Final	<div><div><div><div><div><div>&lt; 24,2</div><div>A</div></div><div><div>24,2-39,2</div><div>B</div></div><div><div>39,2-49,7</div><div>C</div></div><div><div>49,7-59,4</div><div>D</div></div><div><div>59,4-69,4</div><div>E</div></div><div><div>69,4-80,0</div><div>F</div></div><div><div>≥ 80,0</div><div>G</div></div></div><div></div><div>146,0 E</div></div><div><div><div>Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]</div><div></div></div><div><div>CALEFACCIÓN</div><div>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</div><div>124,38</div></div><div><div>ACS</div><div>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</div><div>21,60</div></div><div><div>REFRIGERACIÓN</div><div>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</div><div>-</div></div><div><div>ILUMINACIÓN</div><div>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</div><div>-</div></div></div></div></div>			
Consumo Real inicial (gasoil)	23.000 litros/año 278.763 kWh/año de E.P.			
Consumo real observado final tras la reforma		Consumo real (kWh/año E.P.)	Variación respecto certificación	Variación respecto consumo inicial
	Año 2017	225.123,08	-71,79%	-19,24%
	Año 2018	236.152,65	-70,40%	-15,29%
	Año 2019	250.885,35	-68,56%	-10,00%
	Año 2020	257.760,61	-67,69%	-7,53%

### Estado Actual:

La sala de calderas atiende al servicio de calefacción y ACS, con una acumulación de ACS formada por tres tanques ACV HR600 tipo “tank-in-tank” de 500 litros cada uno.

Se dispone de una caldera hidráulicamente independiente para cada servicio, siendo el consumo anual medio de los últimos años de 23.000 litros.



**Figura 44. Edificio 5. Fotografías del estado actual**

### Estado Reformado:

- Transformando el combustible a gas natural
- Calderas de condensación con cuerpo de aluminio-silicio trabajando en cascada BAXI EUROCONDENS SGB 2x300 kW.
- Producción de ACS convencional a alta temperatura, mediante el uso de tanque de acumulación con serpentín de 750 litros para trabajo a 80 °C.



**Figura 45 Edificio 5. Fotografías del estado reformado**

Finalizada la obra se incorpora el prototipo de adquisición de datos para acceder a las lecturas de los contadores de energía y ACS con lectura M-bus observando a modo de resumen las siguientes lecturas de los contadores generales en los últimos años. Estos reflejan una bajada del consumo de energía primaria no renovable respecto del consumo inicial de un 24%. Esta reducción coincide con la mejora del rendimiento estacional anual que puede provocar la instalación de nuevos generadores y su capacidad de modulación.

Si la comparación se realiza respecto de los datos de la certificación energética se observa una variación mucho mayor cercana al 65%.

**Tabla 8. Consumo general del edificio y su conversión a energía primaria no renovable.**

<b>AÑO</b>	<b>Total, Energía térmica (kWh/año)</b>	<b>Rendimiento Estacional Anual (%)</b>	<b>E. Primaria No renovable (kWh/año)</b>
<b>2017</b>	151.400	80,03	225.123,08
<b>2018</b>	153.400	77,30	236.152,65
<b>2019</b>	165.500	78,50	250.885,35
<b>2020</b>	165.400	76,36	257.760,61



### 3.2.1.8 EDIFICIO 6: EDIFICIO RESIDENCIAL EN LA COSTA DE LUGO



Figura 46. Edificio 6: Vista General del edificio residencial de 97 viviendas en la costa lucense objeto de estudio

EDIFICIO RESIDENCIAL DE 97 VIVIENDAS EN LA COSTA LUCENSE																			
Sala de calderas	En planta baja. Formada por 2 calderas con quemador de Gasoil, ROCA CPA-BT del tipo CPA BT 500 (504 kW) con quemador BAXI TECNO 54LM																		
Número de Plantas	Bajo + 5																		
Número de Viviendas	97																		
Superficie m <sup>2</sup>	12.551																		
Consumo Inicial	15.000 litros de gasoil (muy baja ocupación del edificio)																		
Certificación Energética Inicial	<table><tr><th colspan="2">INDICADOR GLOBAL</th><th colspan="3">INDICADORES PARCIALES</th></tr><tr><td><div><div><div>&lt; 37,5 A</div><div>37,5-57,7 B</div><div>57,7-86,1 C</div><div>86,1-128,2 D</div><div>128,2-271,9 E</div><div>271,9-318,1 F</div><div>≥ 318,1 G</div></div><div>89.8 D</div></div></td><td></td><td><div>CALEFACCIÓN</div><div>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</div><div>62.12</div></td><td><div>ACS</div><div>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</div><div>27.56</div></td><td><div>C</div><div>G</div></td></tr><tr><td colspan="2">Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]</td><td><div>REFRIGERACIÓN</div><div>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</div><div>0.13</div></td><td><div>ILUMINACIÓN</div><div>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</div><div>-</div></td><td><div>-</div><div>-</div></td></tr></table>				INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES			<div><div><div>&lt; 37,5 A</div><div>37,5-57,7 B</div><div>57,7-86,1 C</div><div>86,1-128,2 D</div><div>128,2-271,9 E</div><div>271,9-318,1 F</div><div>≥ 318,1 G</div></div><div>89.8 D</div></div>		<div>CALEFACCIÓN</div> <div>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</div> <div>62.12</div>	<div>ACS</div> <div>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</div> <div>27.56</div>	<div>C</div> <div>G</div>	Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		<div>REFRIGERACIÓN</div> <div>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</div> <div>0.13</div>	<div>ILUMINACIÓN</div> <div>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</div> <div>-</div>	<div>-</div> <div>-</div>
INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES																	
<div><div><div>&lt; 37,5 A</div><div>37,5-57,7 B</div><div>57,7-86,1 C</div><div>86,1-128,2 D</div><div>128,2-271,9 E</div><div>271,9-318,1 F</div><div>≥ 318,1 G</div></div><div>89.8 D</div></div>		<div>CALEFACCIÓN</div> <div>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</div> <div>62.12</div>	<div>ACS</div> <div>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</div> <div>27.56</div>	<div>C</div> <div>G</div>															
Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		<div>REFRIGERACIÓN</div> <div>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</div> <div>0.13</div>	<div>ILUMINACIÓN</div> <div>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</div> <div>-</div>	<div>-</div> <div>-</div>															
Certificación Energética Final	<table><tr><th colspan="2">INDICADOR GLOBAL</th><th colspan="3">INDICADORES PARCIALES</th></tr><tr><td><div><div><div>&lt; 37,5 A</div><div>37,5-57,7 B</div><div>57,7-86,1 C</div><div>86,1-128,2 D</div><div>128,2-271,9 E</div><div>271,9-318,1 F</div><div>≥ 318,1 G</div></div><div>90.6 D</div></div></td><td></td><td><div>CALEFACCIÓN</div><div>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</div><div>62.70</div></td><td><div>ACS</div><div>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</div><div>27.82</div></td><td><div>C</div><div>G</div></td></tr><tr><td colspan="2">Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]</td><td><div>REFRIGERACIÓN</div><div>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</div><div>0.13</div></td><td><div>ILUMINACIÓN</div><div>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</div><div>-</div></td><td><div>-</div><div>-</div></td></tr></table>				INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES			<div><div><div>&lt; 37,5 A</div><div>37,5-57,7 B</div><div>57,7-86,1 C</div><div>86,1-128,2 D</div><div>128,2-271,9 E</div><div>271,9-318,1 F</div><div>≥ 318,1 G</div></div><div>90.6 D</div></div>		<div>CALEFACCIÓN</div> <div>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</div> <div>62.70</div>	<div>ACS</div> <div>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</div> <div>27.82</div>	<div>C</div> <div>G</div>	Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		<div>REFRIGERACIÓN</div> <div>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</div> <div>0.13</div>	<div>ILUMINACIÓN</div> <div>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</div> <div>-</div>	<div>-</div> <div>-</div>
INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES																	
<div><div><div>&lt; 37,5 A</div><div>37,5-57,7 B</div><div>57,7-86,1 C</div><div>86,1-128,2 D</div><div>128,2-271,9 E</div><div>271,9-318,1 F</div><div>≥ 318,1 G</div></div><div>90.6 D</div></div>		<div>CALEFACCIÓN</div> <div>Energía primaria calefacción [kWh/m² año]</div> <div>62.70</div>	<div>ACS</div> <div>Energía primaria ACS [kWh/m² año]</div> <div>27.82</div>	<div>C</div> <div>G</div>															
Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		<div>REFRIGERACIÓN</div> <div>Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]</div> <div>0.13</div>	<div>ILUMINACIÓN</div> <div>Energía primaria iluminación [kWh/m² año]</div> <div>-</div>	<div>-</div> <div>-</div>															
Consumo real observado Inicial	15.000 litros 181.811 kWh/año de E.P. no renovable																		
Consumo real observado final tras la reforma		Consumo real (kWh/año E.P.)	Variación respecto certificación	Variación respecto consumo inicial															
	Año 2018	165.862,37	-85,37%	- 8,77%															
	Año 2019	105.966,25	-90,65%	- 41,71%															
	Año 2020	112.866.01	-90.04%	- 37.92%															

**Estado Actual:**

El edificio es de nueva construcción, entregado en el año 2014 y cuya ocupación se está produciendo paulatinamente. Su diseño cumple el CTE del año 2006. En el momento de actuar sobre la generación el edificio dispone de poca ocupación, con unos consumos anuales reales que no superan los 15.000 litros de gasoil.



**Figura 47. Edificio 6. Fotografías del estado actual.**

La instalación de generación produce ACS y calefacción mediante un único colector y estaciones de transferencia térmica en cada vivienda equipadas todas ellas con contador de energía e intercambiador de placas. Esto permite utilizar la energía térmica tanto para la producción de calefacción, como de ACS.

**Estado Reformado:**

La transformación ha pasado por realizar un cambio de combustible a gas, incorporando quemadores modulantes a gas, instalación receptora de gas natural y contador de energía térmica en sala.



**Figura 48. Edificio 6. Fotografía del estado reformado.**

La transformación en este caso ha sido únicamente de combustible, manteniendo los generadores de baja temperatura y el diseño de la instalación existente.

El consumo obtenido de las lecturas de los contadores refleja la baja ocupación que sigue teniendo el edificio con consumos que si se comparan con el consumo inicial de 15.000 litros de gasoil llega a reducirse del orden de un 40%.

Si esta misma comparación se realiza con relación al consumo que estima la certificación que debería tener, la variación supera el 90%.

**Tabla 9. Energía primaria no renovable registrada tras la transformación de combustible.**

<b>AÑO</b>	<b>Total Energía térmica (kWh/año)</b>	<b>Rendimiento Estacional Anual (%)</b>	<b>E. Primaria No renovable (kWh/año)</b>
<b>2018</b>	115.128	82,60	165.862,37
<b>2019</b>	72.155	81,03	105.966,25
<b>2020</b>	77.906	82,14	112.866,01



### 3.2.1.9 EDIFICIO 7: EDIFICIO DE 76 VIVIENDAS EN LA CORUÑA



Figura 49 Edificio 7: Vista General del edificio de 76 viviendas en La Coruña objeto de estudio

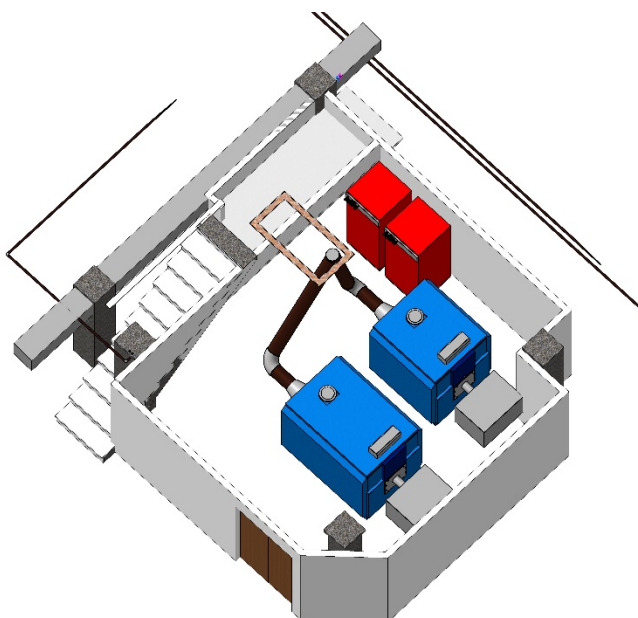
Edificio de 76 viviendas en La Coruña												
Sala de calderas	En planta sótano. Calderas del año 1976, con quemador de Gasoil. YGNIS WA-650 – Calefacción 650.000 kcal/h YGNIS WA-350 – ACS 350.000 kcal/h											
Número de Plantas	8 plantas											
Número de Viviendas	76											
Superficie m²	9450											
Consumo Inicial	58.000 litros / año											
Certificación Energética Inicial	<table><tr><th colspan="2">CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m² año]</th><th colspan="2">EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO2/ m² año]</th></tr><tr><td> 1.028.160,00 kWh/año E. Primaria (84.830 litros de gasoil al año)</td><td>108.8 E</td><td> 28.7 E</td><td></td></tr></table>				CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m² año]		EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO2/ m² año]		 1.028.160,00 kWh/año E. Primaria (84.830 litros de gasoil al año)	108.8 E	 28.7 E	
CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m² año]		EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO2/ m² año]										
 1.028.160,00 kWh/año E. Primaria (84.830 litros de gasoil al año)	108.8 E	 28.7 E										
Certificación Energética Final	<table><tr><th colspan="2">CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m² año]</th><th colspan="2">EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO2/ m² año]</th></tr><tr><td> 664.335,00 kWh/año E. Primaria (558.264 kWh/año de gas)</td><td>70.3 D</td><td> 14.9 D</td><td></td></tr></table>				CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m² año]		EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO2/ m² año]		 664.335,00 kWh/año E. Primaria (558.264 kWh/año de gas)	70.3 D	 14.9 D	
CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m² año]		EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO2/ m² año]										
 664.335,00 kWh/año E. Primaria (558.264 kWh/año de gas)	70.3 D	 14.9 D										
Consumo real observado Inicial	58.000 litros (6h al día) 702.966,96 kWh/año de E.P. no renovable											
Consumo real observado final tras la reforma		Consumo real (kWh/año E.P.)	Variación respecto certificación	Variación respecto consumo inicial								
Año 2019 (9 h/día)		749.564,54	-12,83%	+ 6,63%								
Año 2020 (9 h/día)		678.017,89	-2,06%	-3,35%								

**Estado Actual:**

La sala presta el servicio de calefacción y ACS con dos calderas independientes cada una de ellas para un servicio. Una caldera FERROLI AGS 01 130 - de 150 kW para el servicio de ACS y con quemador ELCO ELO3B20 (Año 1973).

Se dispone de otra caldera FERROLI AGS 01 410 - 475 kW para calefacción y con quemador ELCO KLOCKNER (Año 1973).

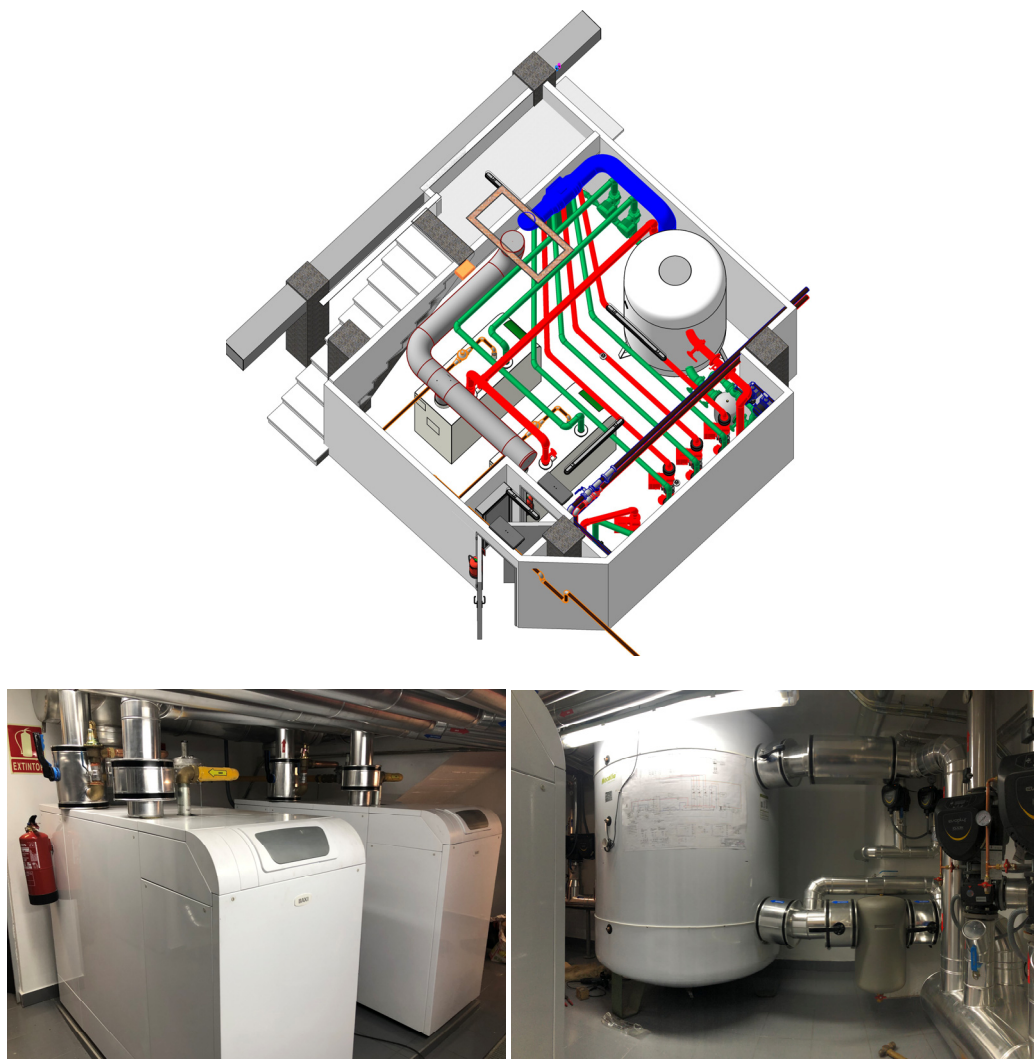
La distribución de calefacción se realiza mediante múltiples columnas sin posibilidad de independizar consumos. El consumo medio de la sala de calderas es de 58.000 litros año para ambos servicios de ACS y calefacción teniendo presente un horario de calefacción de noviembre a mayo de 6 horas diarias.



**Figura 50. Edificio 7. Distribución en planta inicial y fotografías.**

**Estado Reformado:**

Se reforma y adecua exclusivamente la sala de caldera, aprovechando para transformar el combustible a gas, adecuando la sala de calderas a la normativa vigente y obteniendo mejora en la eficiencia energética mediante la sustitución de las calderas existentes por otras 2 de condensación a gas, BAXI SGB 300E. En el momento de esta transformación, se rediseña la sala de calderas a baja temperatura, y se incorporan válvulas termostáticas en los radiadores con el fin de maximizar el confort, e intentar minimizar el consumo, a pesar del interés de la propiedad por mantener las columnas generales.



**Figura 51. Edificio 7. Vista 3D del BIM del nuevo diseño de la sala reformada y fotografías.**

El consumo obtenido de las lecturas de los contadores, teniendo en cuenta que el horario de calefacción ha pasado de 6 horas diarias a 9 horas, refleja los siguientes consumos de energía térmica de la Tabla 10. El rendimiento estacional anual conseguido asciende a 92% lo que implica un alto nivel de eficiencia de la instalación de generación.

**Tabla 10. Energía primaria no renovable registrada tras la transformación de combustible.**

<b>AÑO</b>	<b>Total, Energía térmica (kWh/año)</b>	<b>Rendimiento Estacional Anual (%)</b>	<b>E. Primaria No renovable (kWh/año)</b>
<b>2019</b>	586.550	93,12	749.564
<b>2020</b>	528.740	92,80	678.017

### 3.2.2 METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN EDIFICIOS REALES

Con el hardware y software diseñado, se han dispuesto equipos de medida en diferentes edificios sometidos a reforma, mejora por mantenimiento, o simple adecuación, con el objetivo de comprobar que las medidas de mejora aplicadas han provocado los resultados calculados en la certificación energética del edificio.

Las medidas recogidas establecen un intervalo de lectura mínimo de 24 h, permitiendo analizar la evolución de los consumos diarios de cada edificio. [72]

Por un lado, se dispone de lectura de **contador general** de energía térmica, registrando el consumo total de edificio. Del mismo modo, y atendiendo a lo establecido en el R.D. 1027/2007 por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, y las modificaciones establecidas en el R.D. 238/2013 en lo relativo a la I.T. 1.2.4.4. se dispondrá de otro **contador de energía primaria** que cuantificará los datos de energía utilizados para la producción y mantenimiento del A.C.S. Análogamente se dispondrá de otro contador para **cuantificar las pérdidas** del mantenimiento de la recirculación del A.C.S.

En aquellos edificios que disponen de contador de energía individual, y siempre que sea posible, se ha establecido dentro del protocolo de lectura, la toma de las lecturas de consumo de cada vivienda, por lo que la información recogida puede analizarse hasta por unidad de ocupación.

El volumen de datos analizados supera los 250.000 registros anuales, que se han venido obteniendo durante periodos de más de 3 años, la Tabla 11 recoge el número de registros anuales que se han procesado.

**Tabla 11. Número de registros anuales recogidos por las bases de datos que han sido analizados.**

	Nº Contadores Generales	Nº Contadores ACS	Nº Contadores Energía	Nº registros al año	Nº campos leídos al año
<b>Edificio 1</b>	3	16	16	12.775,00	574.875,00
<b>Edificio 2</b>	3	24	24	18.615,00	837.675,00
<b>Edificio 3</b>	1	0	76	28.105,00	421.575,00
<b>Edificio 4</b>	5	112	112	83.585,00	6.268.875,00
<b>Edificio 5</b>	3	66	66	49.275,00	2.217.375,00
<b>Edificio 6</b>	1		97	35.770,00	536.550,00
<b>Edificio 7</b>	3	76		28.835,00	1.297.575,00
				<b>256.960,00</b>	<b>12.154.500,00</b>

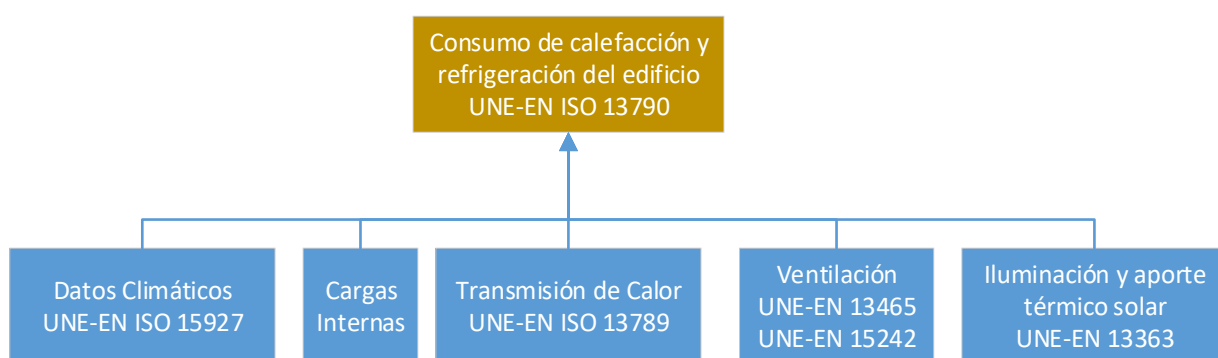
Cabe destacar que cada registro leído difiere, en función del fabricante de cada contador, tipo de contador, unidades de medida, etc. Si bien, la media de campos obtenidos en cada registro de lectura es de 12. Por este motivo el número de valores procesados supera los 12 millones de valores al año.



### 3.2.3 AUTOMATIZACIÓN DE CALCULO ISO 13790 MEDIANTE HOJA DE CALCULO MS EXCEL

Con el fin de materializar una mecánica de cálculo que permita obtener una certificación energética sensible a cualquier parámetro de entrada, se plantea la posibilidad de mecanizar el cálculo descrito en la norma UNE EN ISO 13790, con ayuda de una hoja de cálculo.

Para proceder a automatizar el cálculo, se requiere previamente, la incorporación de datos de entrada acordes con otras normas o estándares vinculados. En la siguiente Figura 52. Normas españolas vinculadas a la UNE-EN ISO 13790., se enumeran algunas de las necesarias para implementar las entradas correctas a la hoja de cálculo.



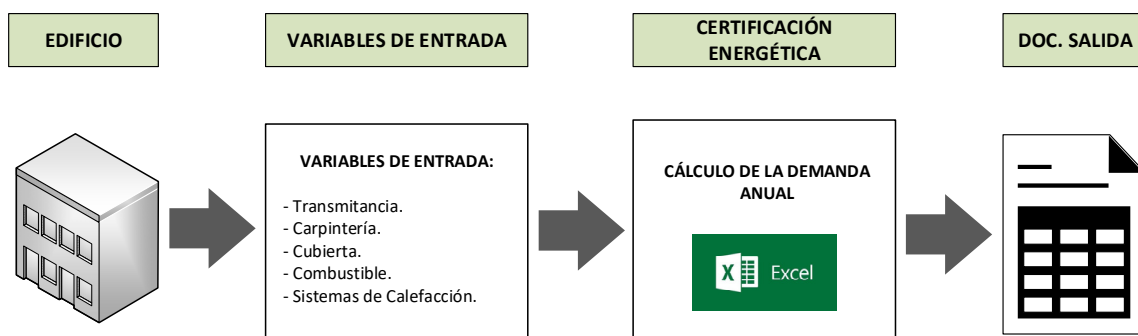
**Figura 52. Normas españolas vinculadas a la UNE-EN ISO 13790.**

Existen diferentes herramientas que han implementado esta metodología de cálculo, muchas de ellas de libre distribución, desarrolladas por empresas, que las ponen a libre disposición de forma altruista o bien con licencia comercial.

Entre las más destacadas y consultadas, que han servido de base para la automatización del cálculo podemos destacar la aplicación desarrollada en Microsoft Excel por el arquitecto D. Oscar Redondo Rivera denominada APP 13790 [73] y que puede ser consultada desde su propio blog.

Otra herramienta similar, también desarrollada en Microsoft Excel, es la desarrollada por la Asociación Nacional de Fabricantes de Materiales Aislantes ANDIMAT [74]. Se trata de una herramienta que realiza un pre-estudio del ahorro energético y de la amortización de la inversión, en obras de rehabilitación. Esta herramienta utiliza también el método de cálculo mensual propuesto en la norma EN 13790 basado en el balance de pérdidas y ganancias útiles para el régimen de invierno y de ganancias y pérdidas útiles en el caso de régimen de verano.

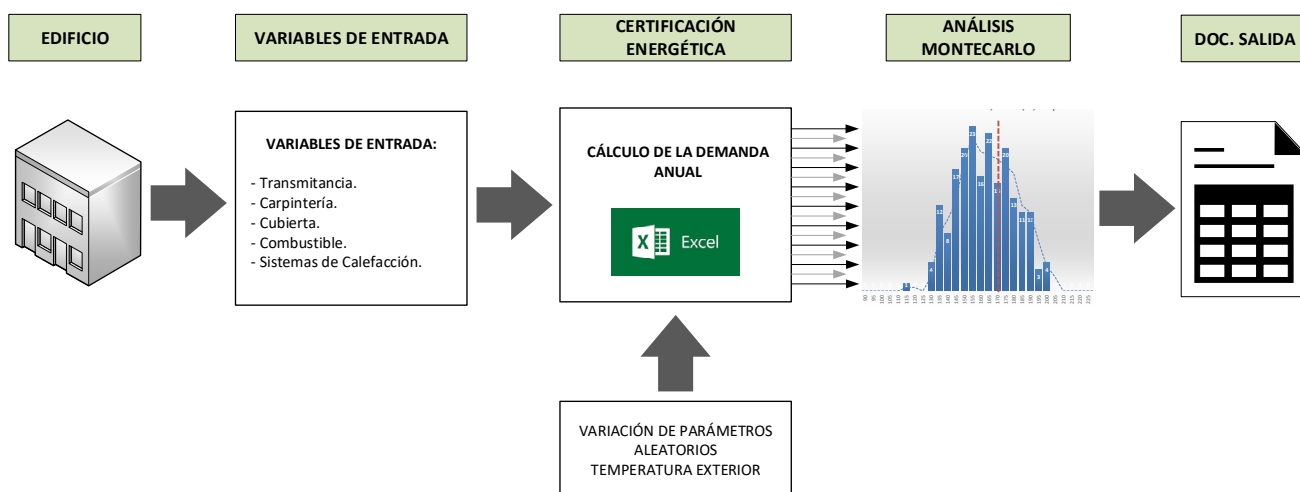
Todas estas aplicaciones realizan un cálculo mensual de la UNE EN 131790 similar al descrito gráficamente en la Figura 53.



**Figura 53. Proceso de cálculo de la mayoría de las herramientas Excel para la implementación de la ISO 13790 existentes.**

Tomando como base estas herramientas, la 13790, y los datos de temperatura y humedad por localidad disponibles en las normas UNE y los anejos del CTE [75], se ha implementado una hoja de cálculo en la que se ha modelizado una pestaña de entrada de datos (**MONTECARLO-IN**) con el fin de generar resultados aplicando múltiples iteraciones, y metodología Montecarlo, para finalmente presentar los resultados en otra pestaña de salida denominada (**MONTECARLO-OUT**).

El procedimiento desarrollado es el que se muestra de forma gráfica en la siguiente:



**Figura 54 Descripción gráfica de la aplicación del método de Montecarlo a la UNE EN 13790.**

Lo más significativo de la pestaña de entrada de datos (MONTECARLO\_IN) es el pequeño panel de control para gestionar las iteraciones de cálculo. Esta pestaña, además, dispondrá de la información general del edificio, necesaria para el cálculo de la EN 13790, con datos relativos a:

1. DATOS GENERALES: Zona climática, Número de viviendas, etc.
2. SUPERFICIES: Calefactadas y refrigeradas, habitables o no habitables.
3. ENVOLVENTE TÉRMICA : Cubierta, Fachadas, Huecos, etc.
4. DATOS DE ENERGÍA: Tipo de combustible, rendimiento, etc.

**0-DATOS GENERALES**

Zona climática según CTE-HE1	C3	La Coruña
Número de viviendas	16	

**1-SUPERFICIES**

	S. habitable (m2)	Altura (m)	Volumen (m3)
Total	2343,00	2,70	6326,10
Calefacción	2343,00	2,70	6326,10
Refrigeración	0,00	2,70	0,00

**INERCIA DEL EDIFICIO**

Medio	165 kJ/m2K
-------	------------

**2- ENVOLVENTE TÉRMICA**

**FACHADAS**

	Norte	Oeste	SurOeste	Sur	SurEste	Este
S. total (m2)	651,10		266,85	187,40	122,61	184,40
S. huecos (m2)	70,40		14,40	25,60	8,64	25,60
S. opaca (m2)	580,70	0,00	252,45	161,80	113,97	158,80
% huecos	10,81%	0,00%	5,40%	13,66%	7,05%	13,88%
	360	270	225	180	135	90

**CUBIERTAS**

	Plana	Inclinada
S. total (m2)	0,00	580,00
S. huecos (m2)	0,00	0,00
S. opaca (m2)	0,00	580,00

**COEF. DE ABSORCIÓN OPACOS**

Fachadas	0,60
Cubiertas	0,60

Figura 55. Entrada de datos generales del edificio.

Se incorpora la arquitectura del edificio, en este apartado, con información que ya no va a ser manipulada ni modificada y que corresponde al edificio en cuestión a analizar.

Posteriormente, desde las casillas de entrada de datos para las iteraciones, podemos observar los campos que pueden ser modificados. A modo de ejemplo, podemos realizar una simulación del edificio con

carpintería “Clase 3” que nos proporciona unos valores de renovación de aire de 9 m<sup>3</sup>/h. Pulsando sobre el botón ITERAR 1, la hoja comenzaría a generar simulaciones modificando de forma aleatoria la temperatura exterior.

En el emplazamiento de la obra, los datos disponibles según histórico y tabla del CTE, es la siguiente:

<b>Localidad:</b>	<b>C1</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep.</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
zona climática	Tª seca	<b>8,19</b>	<b>9,31</b>	<b>10,82</b>	<b>12,33</b>	<b>15,60</b>	<b>16,09</b>	<b>19,29</b>	<b>19,28</b>	<b>17,15</b>	<b>16,08</b>	<b>11,31</b>	<b>8,87</b>
	HR %	74,79	64,63	60,20	57,49	57,35	47,05	40,23	42,15	49,73	62,74	70,58	73,88
	Tª min	4,61	4,03	5,11	6,91	9,65	9,01	11,93	12,29	11,13	11,12	6,98	5,22
	Tª max	11,75	14,16	15,89	17,01	20,49	21,66	25,33	25,55	22,40	20,89	15,48	12,66

La tabla Excel modifica estas temperaturas de forma aleatoria entre el valor mínimo y el valor máximo registrado para el periodo mensual de estudio en ese emplazamiento. Se muestra en la parte superior derecha de la Figura 56, una iteración con modificaciones de cada una de las temperaturas de cada mes.

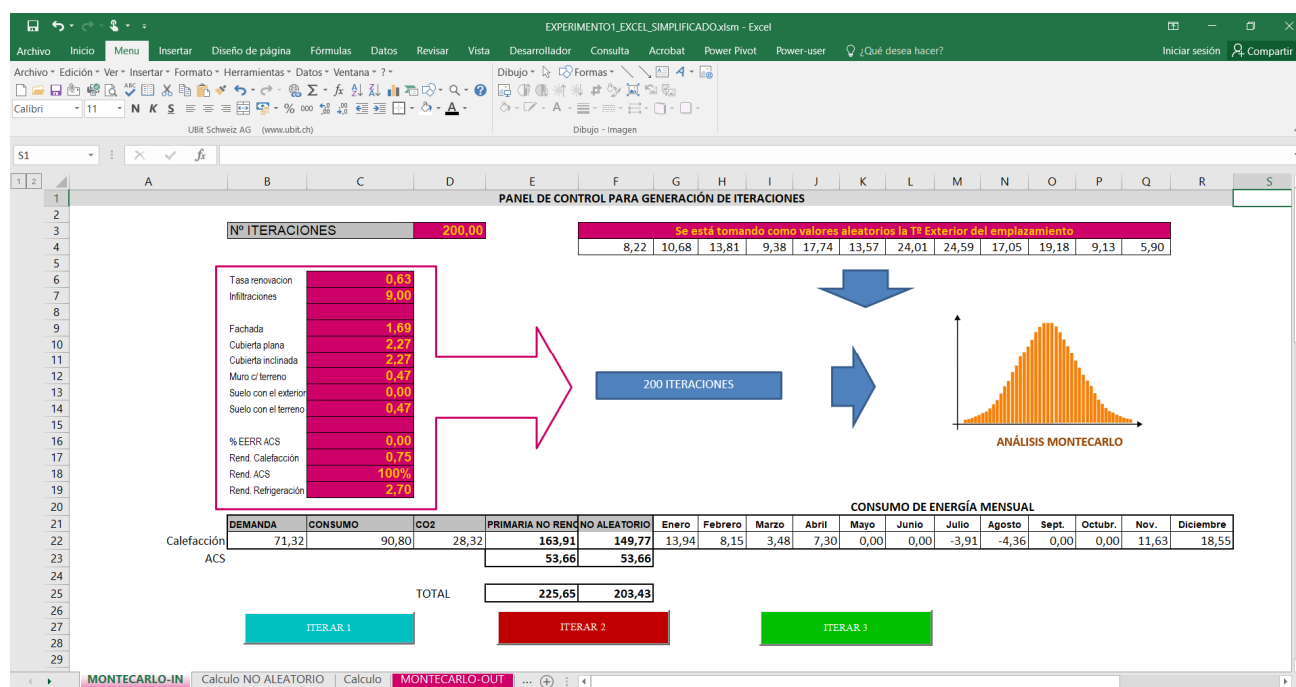


Figura 56. Entrada de valores para lanzar simulaciones aleatorias.

El resultado del proceso iterativo, se anotará en la tabla MONTECARLO-OUT, generando un listado con una fila por cada iteración calculada.

Además del cálculo iterativo, se realiza un cálculo no aleatorio que correspondería a la certificación energética del edificio generada por cualquiera de las herramientas autorizadas por el Ministerio, con el fin de poder comparar este, con la desviación entre el valor central obtenido por Montecarlo.

### 3.2.4 MÉTODO MONTECARLO

En la búsqueda de la optimización energética de un edificio, son muchas las variables que influyen en su consumo. Para poder decidir cuál o cuáles son la variable óptima que optimizan el consumo energético del edificio deberemos resolver un problema matemático con múltiples incógnitas y variaciones no lineales que necesitan ser modelizadas de algún modo.

En la actualidad, se encuentran en auge la utilización de herramientas informáticas basadas en “inteligencia artificial”, que requieren normalmente de un proceso de “aprendizaje”. [76] [77] [78] [79]

Sin embargo, muchas de las variables de entrada que solemos utilizar en el cálculo de la demanda energética de un edificio tienen una componente aleatoria como, por ejemplo, la climatología, la ventilación o la radiación solar.

Desde mediados de los años 40, se han comenzado a utilizar herramientas matemáticas para este tipo de análisis basándose en un método denominado Monte Carlo<sup>17</sup>, y que consiste en obtener una solución acotada por la repetición aleatoria de innumerables simulaciones. La secuencia de los diferentes sucesos aleatorios nos conducirá a la solución del problema.

El método fue desarrollado en Los Álamos National Laboratory (LANL) en el año 1944, dentro del “Proyecto Manhattan” que desarrolló la bomba atómica. Lo desarrollaron los matemáticos John Von Neumann y Stanislaw Ulam, aunque fueron otros matemáticos quienes, con su trabajo le dieron una solidez científica.

La idea le surgió a Ulam, mientras jugaba a las cartas. Se le ocurrió un método en el que, mediante la generación de números aleatorios, pudieran determinar soluciones a ecuaciones complejas que se aplican en el estudio de los neutrones. Era como generar los números con la ayuda de una ruleta, de ahí su nombre.

Vamos a implementar el método de Monte Carlo en Excel para perturbar diferentes variables de entrada en los cálculos de optimización energética. Para ello implementaremos una macro en Microsoft Excel que nos perturbe las variables de entrada. Esta macro será asignada a un botón, de manera que podamos lanzar las

---

<sup>17</sup> John Von Neumann, a mediados de los años 40 con ayuda de los primeros ordenadores, aplica la simulación para resolver problemas complejos que no podían ser resueltos de forma analítica.

iteraciones una vez modificados los parámetros de entrada.

```
Private Sub CommandButton1_Click()

    Dim i
    i = 0
label1:
    i = i + 1
    Calculate
    Sheets("MONTECARLO-IN").Select
    Range("C13:G13").Select
    Selection.Copy
    Sheets("MONTECARLO-OUT").Select
    Dim C As Range
    Set C = Worksheets("MONTECARLO-OUT").Range("e1")
    Do While C.Value <> ""
        Set C = C.Offset(1, 0)
    Loop
    C.Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
    If i < Worksheets("MONTECARLO-IN").Range("e1") Then GoTo label1
End Sub
```

**Figura 57. Ejemplo de Macro excel para copiar resultados de calculos obtenidos con la incorporación de variables aleatorias.**

Con esta herramienta estamos en disposición de poder efectuar múltiples simulaciones energéticas realizando modificaciones de parámetros ambientales como por ejemplo los datos de temperatura exterior, que inciden directamente en el consumo energético del edificio.

Tomando como base el edificio anterior, situado en la provincia de La Coruña, con los siguientes datos ambientales obtenidos del DB-HE1:

La Coruña		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep.	Oct	Nov	Dic
Zona climática  C1	Tª seca	8,19	9,31	10,82	12,33	15,60	16,09	19,29	19,28	17,15	16,08	11,31	8,87
	HR %	74,79	64,63	60,20	57,49	57,35	47,05	40,23	42,15	49,73	62,74	70,58	73,88
	Tª min	4,61	4,03	5,11	6,91	9,65	9,01	11,93	12,29	11,13	11,12	6,98	5,22
	Tª max	11,75	14,16	15,89	17,01	20,49	21,66	25,33	25,55	22,40	20,89	15,48	12,66

Como los datos de temperatura exterior pueden oscilar entre el valor mínimo y máximo registrado, se procede a establecer de forma aleatoria un cálculo mensual que modifique los valores medios utilizando la función Excel ALEATORIO ().

*Ejemplo: =E5+ALEATORIO()\*(E6-E5), siendo E6 el valor máximo y E5 el mínimo.*

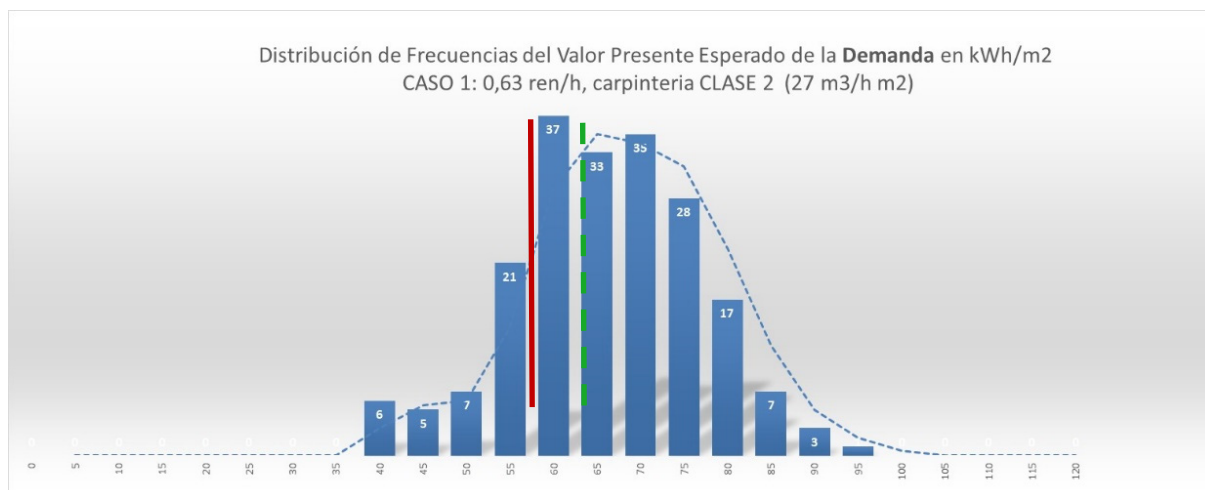
De este modo si elaboramos la certificación energética del edificio anterior, se observa que, para valores estáticos de las temperaturas secas, 0,67 renovaciones de aire y permeabilidad de ventanas categoría 2 (27 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>) se obtiene un consumo de energía primaria no renovable de 56,52 kWh/m<sup>2</sup>.

Si utilizamos valores aleatorios obtenemos para este mismo edificio valores que oscilan en función de las perturbaciones de la temperatura media mensual:

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep.	Oct	Nov	Dic	E. PRIMARIA NO RENOVBABLE
<b>Tª seca</b>	<b>8,19</b>	<b>9,31</b>	<b>10,82</b>	<b>12,33</b>	<b>15,60</b>	<b>16,09</b>	<b>19,29</b>	<b>19,28</b>	<b>17,15</b>	<b>16,08</b>	<b>11,31</b>	<b>8,87</b>	<b>56,52</b>
<b>Iteración 1</b>	10,42	11,84	11,29	12,8	14,47	16,8	24,68	13,02	12,73	16,62	12,15	8,533	<b>46,94</b>
<b>Iteración 2</b>	8,59	9,303	12,86	11,56	11,91	9,269	16,73	12,39	15,64	18,51	11,91	10,21	<b>52,59</b>
<b>Iteración 3</b>	6,257	9,816	5,584	11,45	10,74	14,07	12,99	19,9	18,07	16,6	15,32	7,709	<b>73,53</b>
<b>Iteración 4</b>	5,318	8,958	14,38	14,27	12,39	15,06	17,02	19,31	18,81	14,58	6,997	9,002	<b>67,80</b>
<b>Iteración 5</b>	10,66	4,96	7,701	14,67	19,89	9,307	16,86	24,74	21,97	15,45	11,56	5,465	<b>73,37</b>

Si elaboramos del mismo modo una muestra de 200 iteraciones podemos realizar un análisis tabulado del valor de la E-PRIMARIA NO RENOVBABLE obtenida y su distribución gráfica quedaría tal y como se muestra en la Figura 58, donde también aparece reflejada el valor a temperatura constante media tomada por la mayor parte de las Herramientas validadas como el Ce3X.





**Figura 58. Distribución de frecuencias de simulación de 200 iteraciones.**

La distribución de frecuencias se observa que describe una campana de gauss, si bien su centro (**63,48 kWh/m<sup>2</sup>**) se muestra desplazado hacia la derecha del valor base **56,52 kWh/m<sup>2</sup>**, calculado con los valores de temperatura media considerados por el Código Técnico de la Edificación.

Es importante observar que al visualizar la distribución de frecuencias deberemos observar el impacto en la desviación típica, ya que la implicación de campana de Gauss esbelta nos informa de que los cambios de las posibles variaciones de la temperatura exterior no repercuten en variaciones significativas.

Tras obtener una campana de Gauss en los procesos de cálculo de Montecarlo (Figura 58), y definirse la homocedasticidad<sup>18</sup> e independencia de los datos, se concluye una **distribución normal** tanto para el consumo de energía, como para los costes implícitos en cada cálculo. Es por ello por lo que corresponde un estudio paramétrico de análisis de la varianza (ANOVA), así como una correlación de Pearson<sup>19</sup>, entre otros, a la hora de modelar tales variables, aportando una mayor precisión que la obtenida en estudios no paramétricos [80].

<sup>18</sup> La homocedasticidad es una propiedad fundamental del modelo de regresión lineal general y está dentro de sus supuestos clásicos básicos. Se trata de un requisito para poder aplicar métodos paramétricos.

<sup>19</sup> El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de dependencia lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas y normalmente continuas.

### 3.2.5 METODOLOGÍA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA

La metodología de superficies de respuesta o en inglés RSM, (response surface methodology), se trata de una técnica matemática y estadística utilizada para modelizar problemas en las que una variable se encuentra influenciada por otras. El objetivo de esta técnica es la de conseguir maximizar o minimizar la variable de interés, consiguiendo para ello los valores óptimos de todo el sistema [81]. La aplicación de esta técnica permite refinar los modelos siempre después de conocer los factores más importantes que lo condicionan.

Esta metodología se utiliza para la optimización de sistemas y pertenece al grupo de técnicas utilizadas en el “Diseño de Experimentos” o en inglés DOE (design of experiments).

El diseño de experimentos (DOE) ayuda a investigar los efectos que tienen las variables de entrada (factores) sobre las variables de salida (respuesta). Estos experimentos consisten en una serie de iteraciones, o pruebas, en las que se realizan cambios intencionales en las variables de entrada. En cada iteración se recolectan datos.

Para la implementación de la metodología de superficies de respuesta se ha contado con la herramienta software Minitab que nos ofrece cinco tipos de diseños de experimentos:

- diseños de superficie de respuesta
- diseños de cribado
- diseños factoriales
- diseños de mezcla
- diseños de Taguchi (también llamados diseños robustos de Taguchi).

En particular, como uno de los métodos de diseño experimental más utilizados, el software Minitab utiliza el diseño Box-Behnken [82] [83]. Los diseños de Box-Behnken generalmente tienen menos puntos de diseño que los diseños centrales compuestos y, por lo tanto, son menos costosos de ejecutar con el mismo número de factores. Es más, los diseños de Box-Behnken nunca incluyen ejecuciones en las que todos los factores están en su valor extremo, como todos los valores de configuración bajos.

El primer paso para generar una superficie de respuesta, es determinar qué variables están influyendo en la respuesta de interés. El estudio de variables implicadas en el proceso, se suele hacer por medio de la técnica de análisis de varianza ANOVA, desarrollado por Ronald Fisher [84] pero, en este caso, y en base a la normativa y estudios previos, no es necesario identificar las variables sino optimizarlas, que es el objeto de esta tesis.

Después de identificar estas variables, la superficie de respuesta se puede determinar utilizando un modelo de primer o segundo grado. En el caso del modelo de primer grado, se crea mediante un polinomio de primer orden determinado por las ecuaciones ( 5 ) y ( 6 ).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i) + \varepsilon \quad (5)$$

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \varepsilon \quad (6)$$

Donde ,  $x_1, x_2, \dots, x_i$  son las variables independientes,  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_i$ , son los parámetros de regresión de la superficie estimada a partir de los datos experimentales y  $\varepsilon$  es el error experimental [85].

El modelo de primer orden se utiliza cuando se busca aproximar la superficie de respuesta sobre una región relativamente pequeña, del espacio variable independiente, en una ubicación donde hay poca curvatura, en la función de respuesta. En la mayoría de los casos, la curvatura en la superficie de respuesta es lo suficientemente fuerte como para que el modelo de primer orden no pueda definirla correctamente. En estos casos, el polinomio indicado en la ecuación ( 7 ) requiere el uso de un modelo de segundo orden [86].

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_i \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (7)$$

En el caso de tener un modelo con dos variables, el modelo de primer orden estaría expresado por la ecuación ( 8 ) y el modelo de segundo orden por la ecuación ( 9 ).

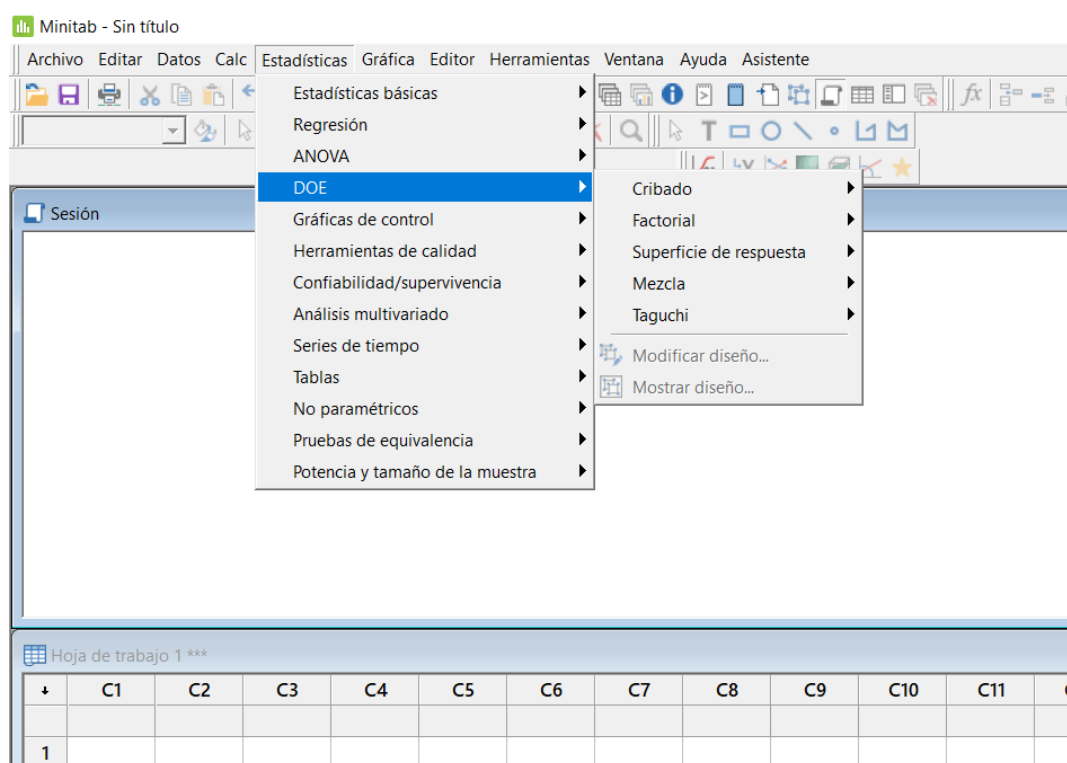
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (8)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (9)$$

En el caso del modelo de segundo orden, la ecuación de una superficie de respuesta nos da la suma de términos al cuadrado, a diferencia de una ecuación de diseño factorial, que nos permiten modelar la curvatura en la respuesta, lo que nos da las siguientes ventajas [81] [86]:

- Mapear una región de una superficie de respuesta. Las ecuaciones de superficie de respuesta registran cómo los cambios en las variables varían la respuesta de interés.
- Encontrar los niveles de las variables que optimizan una respuesta.
- Seleccionar las condiciones de funcionamiento para cumplir con las especificaciones marcadas.
- El modelo de segundo orden es muy flexible. Puede adoptar una amplia variedad de formas funcionales, por lo que funciona bien como una aproximación a la superficie de respuesta.
- Existe una experiencia práctica considerable que indica que los modelos de segundo orden funcionan bien para resolver problemas de superficie de respuesta reales.

Finalmente, debido al interés en la superficie de respuesta, se seleccionó el software Minitab para su cálculo en esta investigación. Otra ventaja realmente interesante del software Minitab es que nos permite realizar gráficas de contorno, lo que nos permite visualizar la forma tridimensional de la superficie de respuesta y analizar los niveles de los factores en los que hay un cambio de forma o tamaño de la superficie de respuesta.



**Figura 59. Vista de las herramientas de diseño de experimentos disponibles en Minitab (C).**

El procedimiento a seguir en Minitab para crear, analizar y visualizar un experimento diseñado son similares para los 5 tipos. Una vez realizado el experimento e ingresados los resultados, Minitab nos proporciona herramientas analíticas y gráficas para ayudar a entender los resultados.

### 3.2.6 OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA

Tanto a nivel industrial, como a nivel económico, estamos acostumbrados a realizar procesos de optimización con el fin de alcanzar los mejores resultados con los mínimos recursos disponibles. La aplicación de métodos científicos capaces de mejorar la efectividad de las decisiones, operaciones, y gestión de las mismas se conoce como la investigación operativa.

Esta necesidad, en el último siglo, ya durante el desarrollo de la Segunda Guerra Mundial, sirvió para obtener una mejor utilización de los recursos bélicos durante la guerra llevado al desarrollo de diferentes metodologías de cálculo, que se han potenciado con la aparición de potentes herramientas de cálculo como son los ordenadores.

Las técnicas de optimización, han sido desarrolladas en la búsqueda de soluciones a diversos problemas planteados en diferentes ámbitos. Comenzó en el ámbito militar, pero también en los procesos químicos, de fabricación, etc. Una forma de resolver muchos de los problemas de optimización ha sido el de utilizar el problema a optimizar, como una caja negra y opaca, a la que disparar multitud de valores de entrada y observar su comportamiento a la salida, hasta encontrar la combinación adecuada que consideraremos el óptimo. Esta forma de resolución, requiere de excesivos recursos y el tiempo de resolución depende de la complejidad del problema, el número de restricciones, etc.

Un problema general de optimización se expresa normalmente de la forma:

$$\min/\max Z = f(X_i)$$

*s. t.*

*Restricciones:*

$$\sum_{i=0}^n a_i \cdot X_i \leq b_i$$

$$\sum_{i=0}^n a_i \cdot X_i \geq b_i$$

En el caso que nos ocupa, se busca la modelización de un sistema energético de un edificio, en el que además de todas sus variables de entrada que afectan al consumo energético deberemos incorporar variables de decisión que nos permitan mejorar el sistema con el fin de optimizarlo energéticamente.

Además de estas variables de decisión, aparece otra no menos importante que es la económica, ya que en ocasiones el mínimo energético, no va a coincidir con el mínimo económico.

La idea inicial de incorporar al edificio, la mejor fachada, la mejor carpintería, la más eficiente generación térmica, etc., idealmente nos puede llevar a la conclusión de que el resultado será el óptimo. Sin embargo, el

aislar en exceso un edificio, provocará la necesidad en época de verano, de incorporar fuentes de generación de frío para compensar el calor, lo que provocará un aumento en el consumo energético. Si además a este problema de optimización, le incorporamos las variables de costes y precio de combustibles, podríamos llegar a optimizar el sistema en base a la inversión. Con este modelo matemático podríamos dar respuesta a cuestiones como dónde invertir un presupuesto de 100.000 € en un edificio:

- ¿qué actuaciones en el edificio provocarán la **mayor reducción de consumo** energético?
- ¿son las actuaciones que provocan un **mayor ahorro económico**?

En la mayor parte de los casos de rehabilitación de edificios, las actuaciones se valoran en función de la necesidad urgente o ineludible de las actuaciones, realizando por ejemplo una inversión en sustitución de calderas, cuando estas han agotado su vida útil, cambiando la fachada cuando esta presenta problemas importantes, reparando cubierta, etc. Sin embargo, en otras ocasiones se realizan actuaciones en búsqueda de la eficiencia, el ahorro energético y económico que no siempre se encuentran perfectamente fundamentadas. [87] [88] [89] [90]

La solución al problema de valorar cuál es la actuación óptima, entre incorporar un campo fotovoltaico para autoconsumo, realizar una instalación solar térmica, o sustituir la carpintería de un edificio, es una decisión que difiere notablemente en función del edificio, de sus instalaciones, su demanda energética, su orientación, el del importe de las obras de ejecución de cada actuación, etc. En síntesis, la optimización numérica nos servirá para alcanzar el principal objetivo de esta tesis, la optimización energética de los edificios. [91] [92] [93]

## 4 RESULTADOS

A continuación, se detallan los resultados obtenidos que han sido estructurado en dos grandes bloques:

En una primera etapa se han **validado y analizado los resultados** obtenidos en ambas fuentes de datos:

- Por una parte, la hoja de cálculo que realiza cálculo según EN 13790.
- Por otra las mediciones realizadas en las diferentes instalaciones, que en ocasiones llegan a analizar datos recopilados durante más de 3 años de monitorización. Para validar el modelo utilizado en Montecarlo hemos utilizado los datos del edificio Nº1.

En una segunda etapa, con estos datos empíricos obtenidos de las instalaciones, (datos de diseño, costes económicos, inversiones realizadas, y consumos energéticos reales), unidos a la herramienta basada en Montecarlo, se ha planteado realizar un **modelado energético** de un edificio.

### 4.1 VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### 4.1.1 VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE DESVIACIONES ENTRE 13790 Y CE3X

Como primera tarea, una vez elaborada la hoja de cálculo, se analizaron las posibles desviaciones que se obtienen en el cálculo según Excel y los resultados de la certificación energética, medidos con algún software reconocido por el Ministerio.

Dado que los datos que se van a analizar son de edificios existentes, se ha optado en este caso por la utilización de la herramienta CE<sup>3</sup>X, una de las reconocidas por el Ministerio. Como medida de partida se toma un edificio de viviendas en la zona residencial de la capital gallega, cuyas instalaciones van a ser reformadas. Se efectúa la certificación energética actual según CE<sup>3</sup>X, y se compara con los datos obtenidos en la hoja de cálculo según 13790.

Además de servir para analizar las desviaciones entre la hoja de cálculo y la herramienta reconocida por el Ministerio, una vez realizadas las obras de reforma en el edificio, se instala el hardware de monitorización y se procede a registrar datos reales. Estos registros, se utilizarán además para confirmar si los datos obtenidos como resultado del cálculo de la certificación energética, confirmando si se materializan los resultados, o bien si estos presentan desviaciones.

Se toma como edificio piloto un edificio de viviendas aislado en zona residencial del sur de la capital gallega. Se trata de un edificio de 4 plantas (bajo + 3) del que se procede a realizar el siguiente análisis:



- Medición detallada del inmueble.
- Tipología de huecos y carpintería.
- Instalaciones de ACS. Generador, tipo y combustible.
- Instalaciones de calefacción. Generador, tipo y combustible
- Existen huecos de persiana.
- Se han tomado distancias a edificios colindantes y sombras de cada fachada.

Se estudia la envolvente y los cerramientos del edificio, junto con el conjunto de las instalaciones térmicas del edificio, y que condicionan notablemente el consumo de energía del mismo.



**Figura 60.** Imagen del edificio piloto Nº 1, tomado como base de validación de resultados.

Además, a este edificio se le presentan medidas de mejora que posteriormente se implementarán. Dichas medidas de mejora podrán en la medida de lo posible ser monitorizadas, al incorporarse contadores de energía y de consumo de ACS con comunicación M-Bus, pudiendo incorporar el hardware diseñado de monitorización que nos permitirá analizar el impacto real de las medidas adoptadas.

Como paso previo, se introducen los datos en el software de cálculo homologado por el Ministerio. CE<sup>3</sup>X Versión 2.3, obteniendo los resultados de la certificación energética mostrados en la Figura 61, y que asciende a un consumo de energía primaria total de **224,5 kWh/m<sup>2</sup> año**. Los datos de entrada utilizados para el cálculo son los que se resumen en la Tabla 12.

Tabla 12 Datos de entrada de la envolvente del edificio piloto

	Nombre	Tipo	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Transmitancia [W/m <sup>2</sup> ·K]	Modo de obtención
CERRAMIENTOS OPACOS	Muro de fachada NE	Fachada	266,85	1,69	Estimadas
	Muro de fachada E	Fachada	184,40	1,69	Estimadas
	Muro de fachada SE	Fachada	122,61	1,69	Estimadas
	Muro de fachada S	Fachada	187,40	1,69	Estimadas
	Muro de fachada SO	Fachada	266,85	1,69	Estimadas
	Muro de fachada NO	Fachada	250,85	1,69	Estimadas
	Muro de fachada N	Fachada	133,40	1,69	Estimadas
	Cubierta con aire	Cubierta	580,00	2,27	Estimadas
	Suelo con terreno	Suelo	580,00	0,47	Estimadas

Nombre	Tipo	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Transmitancia [W/m <sup>2</sup> ·K]	Factor solar	Modo de obtención. Transmitancia	Modo de obtención. Factor solar
NE_V1	Hueco	14,40	3,78	0,63	Estimado	Estimado
E_V1	Hueco	4,80	5,70	0,69	Estimado	Estimado
E_V2	Hueco	13,60	5,70	0,69	Estimado	Estimado
E_V3	Hueco	7,20	5,70	0,69	Estimado	Estimado
SE_V5	Hueco	8,64	5,70	0,69	Estimado	Estimado
S_V3	Hueco	7,20	5,70	0,69	Estimado	Estimado
S_V2	Hueco	13,60	5,70	0,69	Estimado	Estimado
S_V1	Hueco	4,80	5,70	0,69	Estimado	Estimado
SO_V1	Hueco	14,40	5,70	0,69	Estimado	Estimado
NO_V1	Hueco	4,80	5,70	0,69	Estimado	Estimado
NO_V2	Hueco	13,60	5,70	0,69	Estimado	Estimado
NO_V3	Hueco	7,20	5,70	0,69	Estimado	Estimado
NO_V4	Hueco	4,80	5,70	0,69	Estimado	Estimado
N_V1	Hueco	4,80	5,70	0,69	Estimado	Estimado
N_V2	Hueco	13,60	5,70	0,69	Estimado	Estimado

<b>N_V3</b>	Hueco	7,20	5,70	0,69	Estimado	Estimado
-------------	-------	------	------	------	----------	----------

Nombre	Tipo	Potencia nominal [kW]	Rendimiento Estacional [%]	Tipo de Energía	Modo de obtención
Sólo calefacción	Caldera Estándar	145	55,4	Gasóleo-C	Estimado

Nombre	Tipo	Potencia nominal [kW]	Rendimiento Estacional [%]	Tipo de Energía	Modo de obtención
Equipo ACS individual	Efecto Joule		100,00	Electricidad	Conocido

Caldera de calefacción de gasoil estandar de potencia nominal 145 kW, mal aislada con calorifugado de la instalación de muy baja calidad.

Consumo diario ACS: 1.771 litros/día a 60°C producido con termo eléctrico (Efecto Joule).

Con estos datos de entrada, se introducen en la herramienta CE<sup>3</sup>X mediante el uso de sus diferentes formularios de entrada de datos, obteniéndose la siguiente certificación energética del edificio.

#### CALIFICACIÓN ENERGÉTICA OBTENIDA:

CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/m <sup>2</sup> año]		EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO [kgCO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup> año]	
<div> <div>&lt; 24,2 A</div> <div>24,2-39,2 B</div> <div>39,2-60,7 C</div> <div>60,7-93,4 D</div> <div>93,4-200,0 E</div> <div>200,0-226,0 F</div> <div>≥ 226,0 G</div> </div>	224,5 F	<div> <div>&lt; 5,4 A</div> <div>5,4-9,8 B</div> <div>9,8-13,7 C</div> <div>13,7-21,0 D</div> <div>21,0-45,9 E</div> <div>45,9-55,0 F</div> <div>≥ 55,0 G</div> </div>	54,4 F

**Figura 61. Resultados del cálculo de la certificación energética del edificio piloto**

A continuación, procedemos a efectuar el mismo cálculo mediante la hoja del cálculo en Microsoft Excel de la norma ISO 13790.

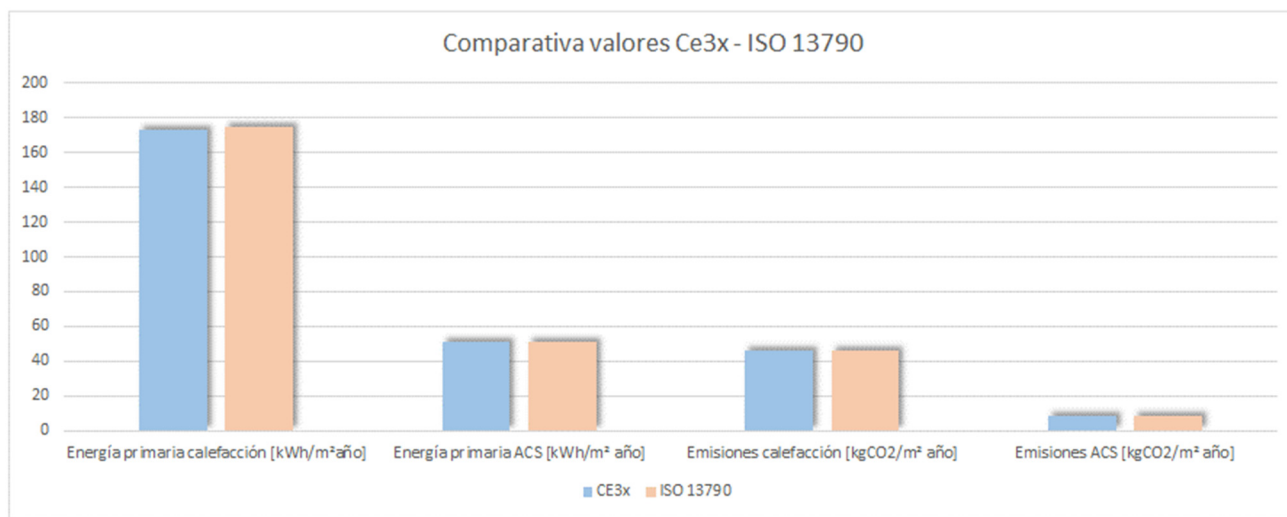
Los datos de entrada utilizados en la hoja de cálculo, son idénticos a los utilizados con CE<sup>3</sup>X y se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla 13. Datos de entrada al Excel correspondientes al edificio piloto.**

	<b>U (W/m²K)</b>
<b>Fachada</b>	1,69
<b>Cubierta inclinada</b>	2,27
<b>Suelo con el terreno</b>	0,47

<b>FACHADAS</b>	<b>Norte</b>	<b>Oeste</b>	<b>Suroeste</b>	<b>Sur</b>	<b>Sureste</b>	<b>Este</b>
<b>Sup total (m²)</b>	651,1	0	266,85	187,4	122,61	184,4
<b>Sup huecos (m²)</b>	70,4	0	14,4	25,6	8,64	25,6
<b>Sup opaca (m²)</b>	580,7	0	252,45	161,8	113,97	158,8
<b>% huecos</b>	0,10	0	0,05	0,13	0,07	0,13

Los resultados obtenidos son muy similares a los obtenidos directamente con la aplicación CE<sup>3</sup>X. En la siguiente figura se representa gráficamente dicha variación correspondiente a la tabla con los datos obtenidos y sus diferencias:

**Figura 62. Gráfico comparativo entre herramienta CE<sup>3</sup>X y la hoja Excel.**

**Tabla 14 Resultados comparativos entre herramienta CE<sup>3</sup>X y la hoja Excel.**

	CE <sup>3</sup> X	ISO 13790	% VARIACION
Energía primaria calefacción [kWh/m <sup>2</sup> año]	173,41	174,52	-0,64%
Energía primaria ACS [kWh/m <sup>2</sup> año]	51,04	50,84	0,39%
Emisiones calefacción [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> año]	45,74	46,00	-0,57%
Emisiones ACS [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> año]	8,65	8,60	0,58%

Se observa que las diferencias en el cálculo de la certificación energética utilizada con CE<sup>3</sup>X y el método de cálculo según ISO 13790, son prácticamente nulas.

Observamos que las variaciones entre los resultados obtenidos con la herramienta CE<sup>3</sup>X y el Excel apenas difieren, si bien esto se ha producido para unos parámetros arquitectónicos determinados. Con el fin de validar el uso de esta hoja de cálculo, se procede a modificar estos parámetros arquitectónicos del edificio como pueden ser los valores de transmitancia de su envolvente, para comprobar que producen efectos similares en ambas herramientas de cálculo y poder validar los resultados.

Cambiando los parámetros de la envolvente se obtienen nuevas certificaciones, una para cada variación, observando que dichas variaciones sobre el modelo de ISO 13790 producen efectos idénticos, como se puede apreciar en la Tabla 15 y Tabla 16:

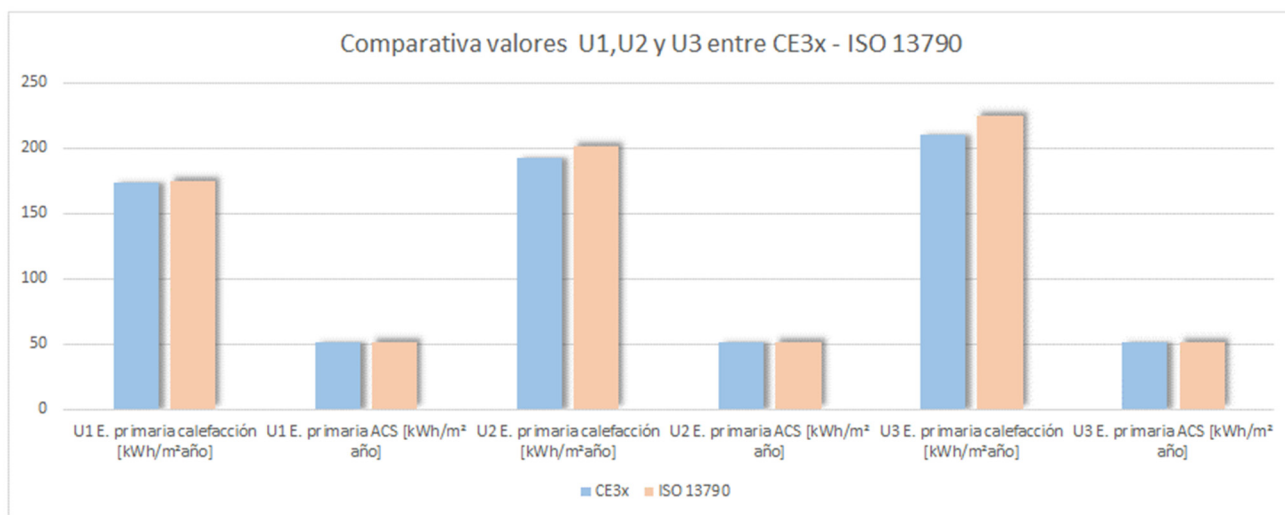
**Tabla 15 Descripción de las variaciones realizadas en la envolvente del edificio.**

	U <sub>1</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	U <sub>2</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	U <sub>3</sub> (W/m <sup>2</sup> K)
<b>Fachada</b>	1,69	2,38	2,38
<b>Cubierta inclinada</b>	2,27	2,27	3,85
<b>Suelo con el terreno</b>	0,47	0,47	1,0

**Tabla 16. Resultados obtenidos y su comparación entre CE<sup>3</sup>X y Excel, para cada variación de la envolvente realizada.**

		CE <sup>3</sup> X	ISO 13790	VARIACION %
<b>Valores U<sub>2</sub> cerramientos</b>	Energía primaria calefacción [kWh/m <sup>2</sup> año]	192,50	201,84	-0,48%

	Energía primaria ACS [kWh/m <sup>2</sup> año]	51,04	50,84	0,39%
<b>Valores U<sub>3</sub> cerramientos</b>	Energía primaria calefacción [kWh/m <sup>2</sup> año]	210,98	224,50	-0,64%
	Energía primaria ACS [kWh/m <sup>2</sup> año]	51,04	50,84	0,39%



**Figura 63. Gráfico comparativo entre herramienta CE<sup>3</sup>X y la hoja Excel de cada variación realizada a la envolvente.**

A la vista de los resultados obtenidos y observando que estos difieren en una medida inferior al 1%, se concluye que la utilización de la hoja Excel es equivalente a la simulación mediante CE<sup>3</sup>X, o similar.

#### 4.1.2 ANÁLISIS DEL IMPACTO DE MEDIDAS CORRECTORAS EN EDIFICIOS REALES

Para comenzar a analizar el impacto de las medidas correctoras, partimos del edificio analizado anteriormente, y que está formado por 16 viviendas. Su certificación energética daba los resultados mostrados Figura 61, y nos confirma un consumo de energía primaria total de **(F) 224,5 kWh/m<sup>2</sup> año**. De la certificación energética inicial, la propiedad ha estudiado las diferentes medidas de mejora, para finalmente optar por la ejecución del conjunto de obras que lleva por título: “ADECUACIÓN DE SALA DE CALDERAS A CONDENSACIÓN, TRANSFORMACIÓN DE COMBUSTIBLE, Y CENTRALIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ACS.”

Esta medida plantea la realización de una serie de obras en el edificio, que principalmente se centran en actualizar la actual sala de calderas, incorporando calderas de condensación a gas natural. Al mismo tiempo, y dado que el suministro de gas requiere del pago de un contrato con unos gastos fijos todos los meses, se aprovecha este suministro para centralizar también la producción de ACS. De esta manera, en periodos de

verano, la sala de calderas seguirá en funcionamiento para dar el servicio de ACS. Esta modificación se considera por parte de los diferentes propietarios de la comunidad como muy atractiva, ignorando su impacto energético, y primando la disponibilidad de espacio en las viviendas ( al poder retirar los termos eléctricos).



**Figura 64. Estado de partida de la sala de calderas del edificio piloto.**

Todos intuyen que la incorporación de la generación de ACS en el edificio es más rentable y eficiente que con termos eléctricos, pero la realidad desde la ingeniería encargada de la redacción del proyecto es quien le confirmó este hecho, demostrándolo con la información resultante de la certificación energética y que se muestra con detalle en la Figura 65.

La certificación pantea que tras la ejecución de la reforma se obtendrá una nueva certificación tipo **(E)** **122,7 kWh/m<sup>2</sup> año**, como puede observarse en los datos de salida del CE<sup>3</sup>X.

#### ANÁLISIS TÉCNICO

Indicador	Calefacción			Refrigeración			ACS			Iluminación			Total	
	Valor		ahorro respecto a la situación original	Valor		ahorro respecto a la situación original	Valor		ahorro respecto a la situación original	Valor		ahorro respecto a la situación original	Valor	ahorro respecto a la situación original
Consumo Energía final [kWh/m <sup>2</sup> año]	85.96		41.6%	0.00		-%	17.13		34.4%	-		-%	103.08	40.5%
Consumo Energía primaria no renovable [kWh/m <sup>2</sup> año]	102.29	E	41.0%	0.00	-	-%	20.38	E	60.1%	-	-	-%	122.67	E 45.3%
Emisiones de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> año]	21.66	E	52.6%	0.00	-	-%	4.32	E	50.1%	-	-	-%	25.98	E 52.2%
Demanda [kWh/m <sup>2</sup> año]	81.49	E	0.0%	0.00	-	-%								

**Figura 65. Resultados del análisis técnico de las medidas de mejora resultantes según el CE<sup>3</sup>X.**



Finalmente, la propiedad, decide realizar la inversión en las medidas planteadas y que ascienden a un importe de ejecución material de 58.384,06 €.

Atendiendo a la certificación energética. El edificio debería disponer de un consumo en ACS y calefacción acorde a los siguientes datos extraídos de su certificación energética original:

INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES					
<div><div>&lt; 24.2 A</div><div>24.2-39.2 B</div><div>39.2-60.7 C</div><div>60.7-93.4 D</div><div>93.4-200.0 E</div><div>200.0-226.0 F</div><div>≥ 226.0 G</div></div>	224.5 F	CALEFACCIÓN		ACS			
		Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	Energía primaria ACS [kWh/m² año]	G		
		173.41		51.04			
		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN			
		Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-	Energía primaria iluminación [kWh/m² año]	-
				0.00		-	

**Figura 66. Consumo de energía primaria no renovable obtenidos del certificado energético del edificio.**

La información de la que se dispone en el momento de la actuación, tan solo corresponde al consumo de combustible para calefacción y asciende a 13.000 litros/año.

Estos 13.000 litros convertidos a energía térmica corresponden a  $13.000 \times 10,28$  kWh/litro a una energía anual de: **133.640 kWh/año**. Aplicando el factor de conversión de la energía utilizada (gasoil) a energía primaria no renovable, disponible en el “Documento Reconocido del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE): FACTORES DE EMISIÓN DE CO<sub>2</sub> y COEFICIENTES DE PASO A ENERGÍA PRIMARIA DE DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA FINAL CONSUMIDAS EN EL SECTOR DE EDIFICIOS EN ESPAÑA”<sup>20</sup>, la energía primaria no renovable equivalente asciende a:

$$133.640 \times 1,179 = \mathbf{157.561 \text{ kWh/año}} \text{ de Energía Primaria no renovable.}$$

Si calculamos el dato por unidad de superficie  $157.561 \text{ kWh/año} / 2.343 \text{ m}^2 = \mathbf{67,24 \text{ kWh/m}^2 \text{ año}}$ , inferior a los datos estimados de la certificación **173,41 kWh/m² año** destinados a calefacción.

Sin embargo no disponemos de consumos reales de cada vivienda (electricidad) para comprobar la realidad del consumo energético que han tenido en la producción del ACS. Por este motivo solo podemos

<sup>20</sup> Documento Reconocido del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE): FACTORES DE EMISIÓN DE CO<sub>2</sub> y COEFICIENTES DE PASO A ENERGÍA PRIMARIA DE DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA FINAL CONSUMIDAS EN EL SECTOR DE EDIFICIOS EN ESPAÑA, disponible en

[https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores\\_emision\\_CO2.pdf](https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf)

llegar a la conclusión de que el consumo energético que viene teniendo el edificio difiere a la baja un 35,73 % del representado en la certificación energética inicial.

	CE <sup>3</sup> X	DATOS REALES	% VARIACION
Energía primaria calefacción [kWh/m <sup>2</sup> año]	173,41	67,24	-61,22%
Energía primaria ACS [kWh/m <sup>2</sup> año]	51,04	--	--

Tras la aprobación de la ejecución de las obras de mejora del edificio, los datos de la aplicación de las medidas correctoras contemplarían una distribución del consumo de energía para calefacción de **102,29** kWh/m<sup>2</sup> año, y **20,38** kWh/m<sup>2</sup> año para ACS. Esta reducción se produce por:

- 1) Incorporación de tecnología de condensación.
- 2) Cambio de combustible. (*gasoil a gas para calefacción, y electricidad a gas para ACS*).
- 3) Mejora del aislamiento.

Sin embargo, antes de proceder al análisis, es importante conocer que técnicamente la tipología de actuación solo pasa por sustituir los generadores por otros, y cambiar el combustible. La regulación, y el diseño de la sala, se mantienen tradicionalmente en generación de ACS a alta temperatura (80°C), manteniendo la consigna de 60°C para el tanque acumulador de ACS.

Las calderas instaladas son de marca BAXI, modelo BIOS PLUS de 2 x 70 kW, disponen de una regulación electrónica SIEMENS Multilevel capaz de ajustar y modular tanto la cantidad de gas que combustionan, como el caudal de agua que se circula por el cuerpo de la caldera. Esto hace que el sistema de gestión técnica de los generadores pueda ajustar desde el 16% de la potencia de un solo generador 11,2 kW, hasta los 140 kW de potencia de ambos generadores trabajando al 100%.

A pesar de disponer tanto de los equipos como de la regulación adecuada, el diseño hidráulico de la sala (ver Figura 28) hace que, cuando existe demanda de ACS, las calderas (*y su sistema de gestión y regulación*) anulen su funcionamiento, pasando a alcanzar el 100% de la potencia con el fin de atender el servicio de producción de ACS. La prioridad de ACS implica subir cuanto antes a una temperatura de 80°C en la impulsión. Por lo tanto, disponemos de un sistema domótico de gestión pero que se anula pasando a trabajar casi a valores todo o nada, mientras exista demanda de ACS.

La documentación técnica del fabricante del tanque de producción<sup>21</sup> de ACS, informa de la necesidad de trabajar con temperatura de 80 °C en primario para garantizar la temperatura máxima de 70 °C.

Cuando la demanda sin embargo es de calefacción, el sistema de regulación da prioridad a buscar un punto de modulación que maximice la condensación en el cuerpo de caldera, variando la modulación del quemador y el caudal de agua que entra al cuerpo de la caldera. La regulación intentará que el salto térmico entre impulsión y retorno sea lo mayor posible para favorecer la condensación.

En este sentido, se descargan los datos analizando los consumos y valores reales finalmente consumidos por el edificio, y como podemos observar el contador de energía primaria, desde el 20/06/2016 y durante 3 años, ha registrado los siguientes valores de consumo diario que podemos observar en la Figura 67.



**Figura 67. Distribución trianual del consumo energético [kWh/día] del edificio N°1.**

Observándose los periodos de invierno y verano con consumos diarios muy diferentes, acotando dichos datos anualmente para contrastarlos con los valores de certificación se obtienen los resultados de la Tabla 17.

**Tabla 17. Rendimiento estacional anual y consumo de energía registrado en el edificio 1 durante 3 años.**

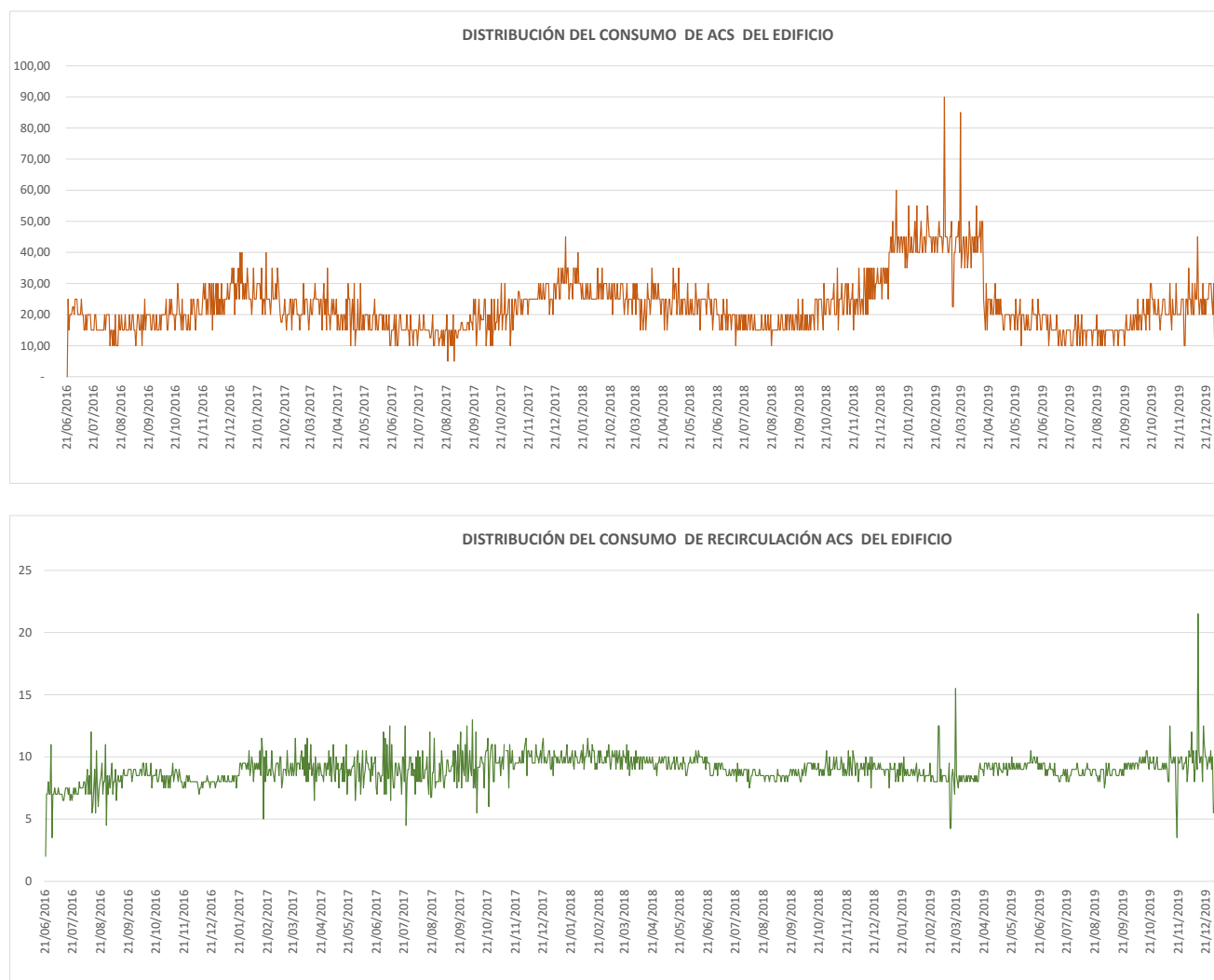
RENDIMIENTO ESTACIONAL ANUAL Y CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE TOTAL REGISTRADO					
AÑO	CONSUMO ENERGÍA UTIL [kWh/año]	CONSUMO GAS [kWh/año]	R.E.A [%]	CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/año]	Consumo [kWh/m²año]
2017	86.100,00	98.954,00	87,01	117.755,43	<b>50,26</b>

<sup>21</sup> Baxi 500E, información técnica disponible en : <https://www.baxi.es/-/media/inriver/20391-2197.pdf>

2018	105.690,00	125.225,00	84,40	149.017,89	<b>63,60</b>
2019	98.630,00	116.008,00	85,02	138.049,52	<b>58,36</b>

De la misma manera, disponemos de los valores de energía utilizados para la producción de ACS y que son obtenidos con el contador de primario de producción e ACS. De idéntica manera también se dispone del contador de recirculación que nos monitoriza las pérdidas por recirculación de la columna general.

En particular, las distribuciones de consumos destinados a la producción de ACS se detallan en la Figura 68.



**Figura 68. Distribución trianual del consumo energético [kWh/día] utilizado para ACS del edificio N°1.**

Al igual que ocurre con la calefacción, los consumos del primario y las pérdidas por recirculación, se observan mayores durante los meses de invierno, aunque esta diferencia entre invierno y verano es muy pequeña. Podemos concluir, por lo tanto, que las pérdidas por transporte se mantienen bastante estables durante todo el año.

Por otro lado, analizando el consumo de energía que se ha utilizado para la producción de ACS real en el edificio, distribuido en los últimos 3 años es el que resume la Tabla 18.

**Tabla 18. Consumo de e.p. no renovable destinada a producción de ACS del edificio Nº 1.**

<b>CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PRODUCCIÓN DE ACS</b>			
<b>AÑO</b>	<b>CONSUMO ENERGÍA ÚTIL PARA PRODUCCIÓN ACS [kWh/año]</b>	<b>CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE ACS [kWh/año]</b>	<b>Consumo ACS [kWh/m²año]</b>
2017	<b>7.500,00</b>	10.162,62	<b>4,34</b>
2018	<b>8.475,00</b>	11.838,89	<b>5,05</b>
2019	<b>9.495,00</b>	13.167,02	<b>5,62</b>

La información obtenida se obtiene de las lecturas del contador de energía térmica (energía útil para producción de ACS). El consumo de energía primaria corresponde a la lectura de energía útil ajustada con:

- el Rendimiento Estacional Anual (REA) obtenido de cada año.
- el factor de conversión a energía primaria no renovable correspondiente al combustible gas natural [71].

Se observa que los consumos obtenidos son muy inferiores (*aproximadamente un 25%*) a los calculados en la certificación energética y que alcanzaban valores de **20,38 kWh/ m²año**.

Analizando los valores recogidos por los contadores de energía de recirculación (*registran las pérdidas por transporte en ACS*), se observa que las pérdidas del edificio en recirculación de ACS representan valores cercanos al 50% del total de la energía consumida para la producción de ACS.

<b>CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PÉRDIDAS POR TRANSPORTE</b>		
<b>AÑO</b>	<b>ENERGÍA UTIL PARA RECIRCULACIÓN ACS [kWh/año]</b>	<b>CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE RECIRCULACIÓN ACS [kWh/año]</b>

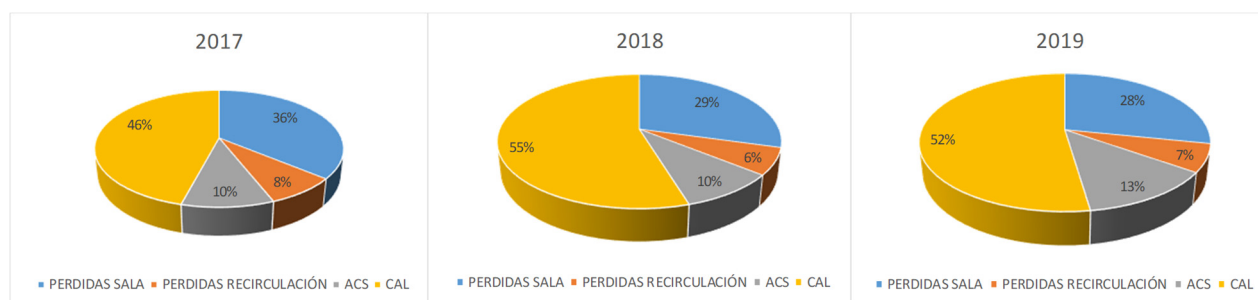
2017	3.347,50	4.535,91
2018	3.383,00	4.725,77
2019	3.289,00	4.560,96

El consumo de energía final durante el primer año ha sido de 86.100 kWh/año, lo que corresponde a un consumo energético de energía primaria no renovable tratándose de combustible gas de:

AÑO	CONSUMO ENERGÍA UTIL [kWh/año]	CONSUMO GAS [kWh/año]	R.E.A [%]	CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/año]	Consumo [kWh/m²año]
2017	86.100	98.954	87,01	117.755,43	<b>50,26</b>

$$(86.100 \text{ kWh/año} / \text{REA}) \times \text{Factor paso (1,19)} / 2.343 \text{ m}^2 = \mathbf{50,26 \text{ kWh/m}^2 \text{ año}}$$

La distribución de esta energía, consultando los contadores parciales del edificio y de la sala de calderas podemos observar que es la siguiente:



**Figura 69. Distribución porcentual del consumo energético del Edificio 1.**

Realmente el consumo real de energía primaria no renovable del edificio, presenta un valor muy inferior al obtenido de la certificación energética (29% de la estimación), si bien el ahorro porcentual calculado ( $224,5 \text{ kWh/m}^2 \rightarrow 160,51 \text{ kWh/m}^2$ ) de un 28,50 %, se ha aproximado pasando de ( $67,42 \text{ kWh/m}^2 \rightarrow 49,76 \text{ kWh/m}^2$ ), es decir un **26,2% de ahorro**.

Ante esta evidencia, se procede a analizar las posibles causas de estas desviaciones, entre las que podrían estar:

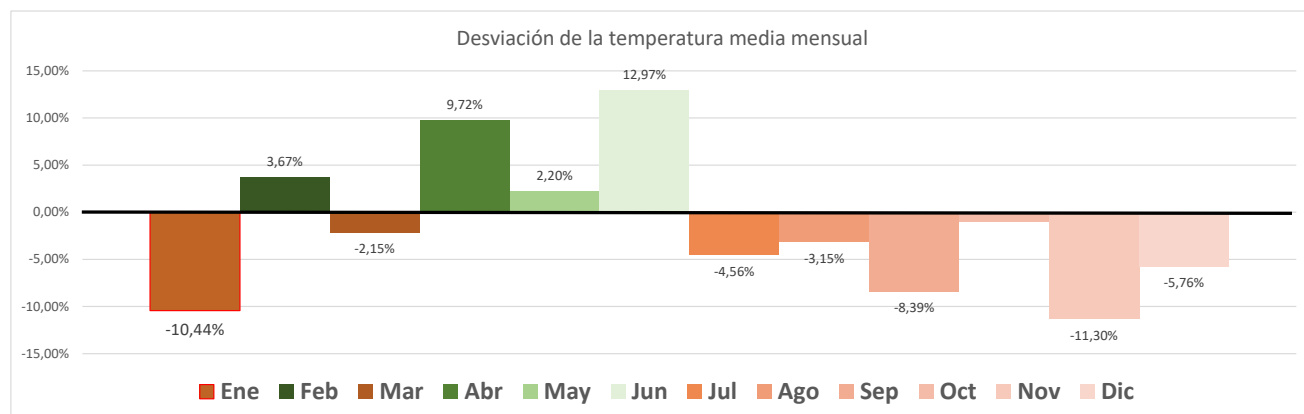
- Errores de partida en la certificación energética inicial.

- Variaciones en las temperaturas medias exteriores.
- Baja utilización del edificio.

En la búsqueda de posibles causas de estas desviaciones, se comienza revisando las **certificaciones energéticas** y se observa que estas están realizadas en muchos casos con CE<sup>3</sup>X de aislamiento y envolvente “por defecto” que son estimados por el software utilizado CE<sup>3</sup>X. Estos valores podrían ser causantes de que el consumo inicial sea muy superior al observado del estudio de las facturas o lecturas de contadores.

Para analizar como posible origen de las desviaciones la **temperatura media exterior**, se comienza consultando las temperaturas medias exteriores obtenidas de la estación meteorológica más cercana, y comparando estas con las utilizadas en el cálculo del programa CE<sup>3</sup>X se observa la siguiente desviación mensual:

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep.	Oct	Nov	Dic
<b>T exterior</b>	<b>8,19</b>	<b>9,31</b>	<b>10,82</b>	<b>12,33</b>	<b>15,60</b>	<b>16,09</b>	<b>19,29</b>	<b>19,28</b>	<b>17,15</b>	<b>16,08</b>	<b>11,31</b>	<b>8,87</b>
<b>2017</b>	7,33	9,65	10,59	13,53	15,94	18,18	18,41	18,68	15,71	15,92	10,03	8,36
<b>Desviación</b>	-10,44%	3,67%	-2,15%	9,72%	2,20%	12,97%	-4,56%	-3,15%	-8,39%	-1,00%	-11,30%	-5,76%

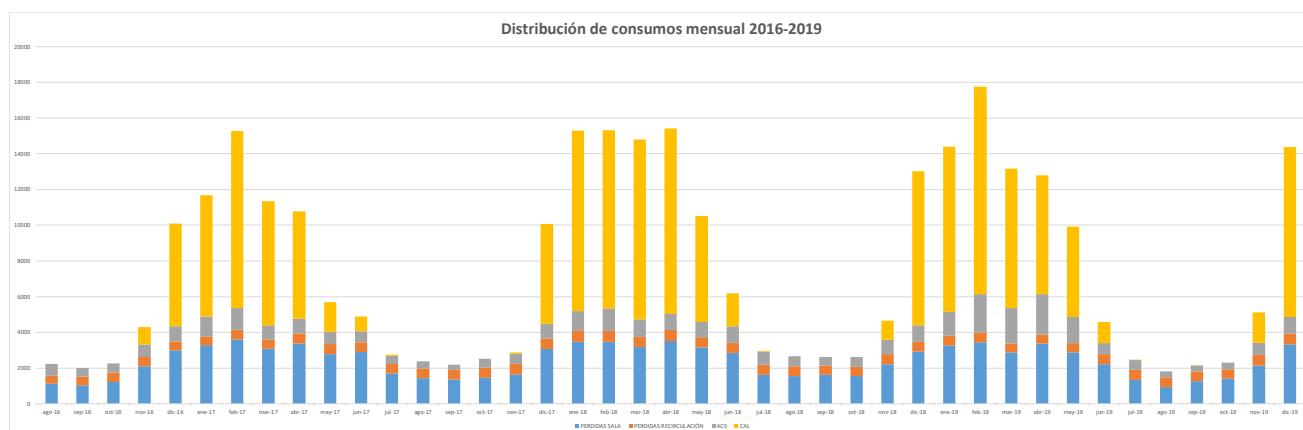


**Figura 70. Desviación de la temperatura exterior respecto de las temperaturas medias mensuales para el emplazamiento del edificio 1.**

Se observa que los valores de temperatura media anual se han reducido un 1,05% respecto a los valores de referencia. Esto implicaría un consumo ligeramente superior al obtenido de cálculo en la certificación, si bien hemos obtenido 49,76 kWh/m<sup>2</sup> año frente a los 160,51 kWh/m<sup>2</sup> de cálculo.



Realizando el mismo análisis en el periodo 2017-2019 se obtiene que los valores de **consumo total anual** se han incrementado (21,7%) del año 2017 al 2018, comparando esto con la temperatura media mensual, se observa que esta se ha reducido un 2,49%. En el periodo 2018-2019, el consumo se redujo un 8,63%, mientras que la temperatura media se redujo un 0,52%.



**Figura 71. Distribución mensual de consumos registrados en el Edificio 1.**

Dado que estas cifras no justifican, ni la evolución del consumo ni la diferencia entre los valores de cálculo y los reales recogidos, procedemos a analizar los datos de los consumos individuales, para verificar la ocupación y uso de los servicios de calefacción y ACS.

De las 16 viviendas, se observa que tan solo **13 tienen consumo**, por lo que se deduce que están habitadas, y de ellas la mitad están por debajo del consumo medio, lo que indica que la ocupación de la vivienda es baja.

Del mismo modo sucede con el consumo de calefacción, se observa que solo 13 de las 16 viviendas presentan consumo. Cabe destacar que, si bien en la vivienda Nº 10 tenemos consumo de ACS, esta no lo tiene de calefacción. Caso contrario tenemos en la vivienda Nº 12 donde disponemos de consumo de calefacción, pero no de ACS. El consumo de calefacción a diferencia del de ACS se observa muy por debajo del estimado por la certificación. Solo 4 viviendas presentan un consumo cercano al estimado por la certificación.

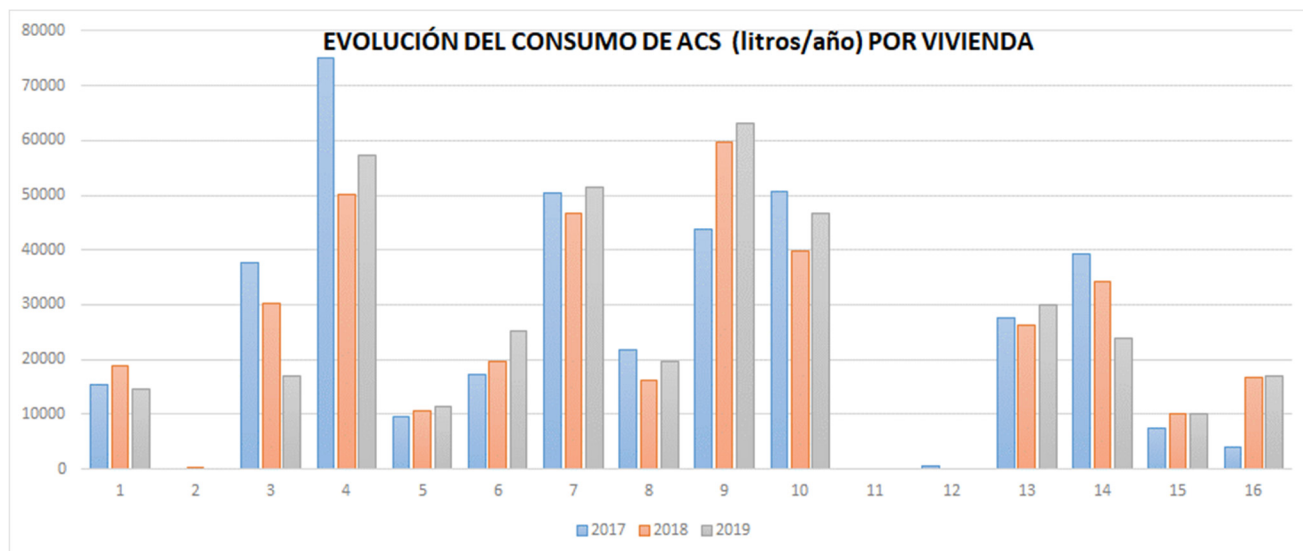


Figura 72. Consumo de ACS en l/año por vivienda del Edificio 1, durante el periodo 2017-2019

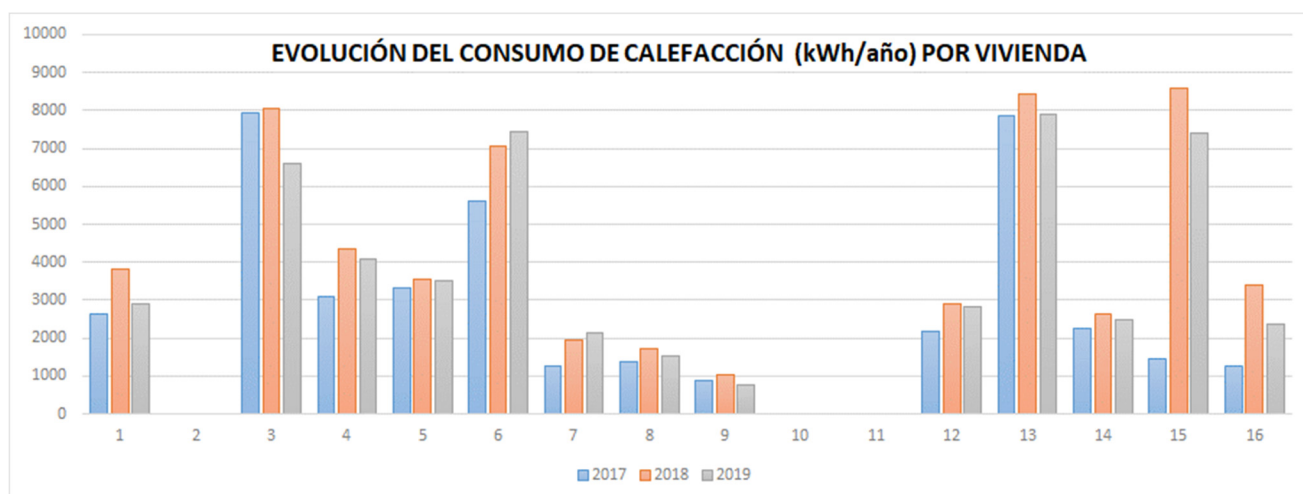


Figura 73. Consumo de CALEFACCION en kWh/año por vivienda del Edificio 1, durante el periodo 2017-2019

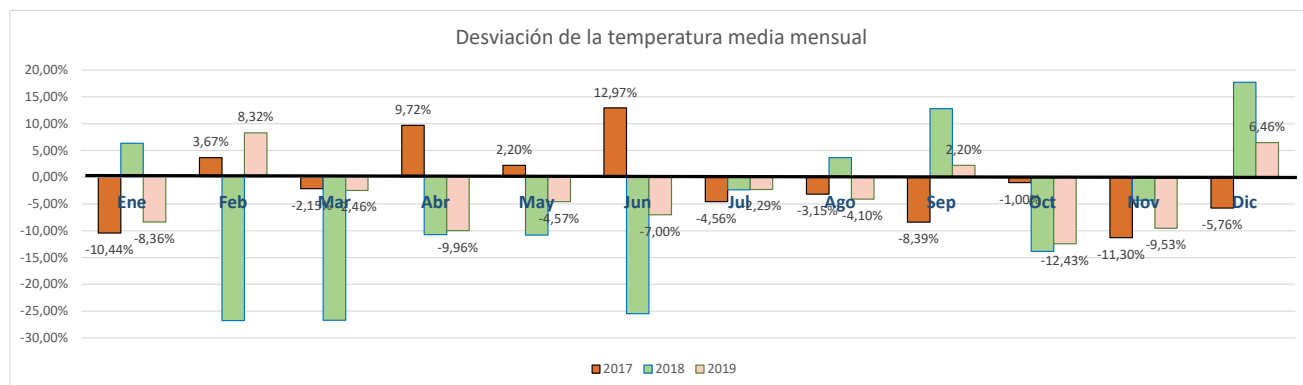
Se observa que el promedio de temperatura exterior es más o menos constante, reduciéndose ligeramente cada año, por lo que el ligero aumento de consumo registrado en 2018 y 2019 tiene su justificación, al mantenerse la demanda y ocupación del edificio.

Tabla 19. Registro de temperaturas medias exteriores de la estación meteorológica de Santiago.

AÑO	Temperatura Media Exterior (°C)
2017	13,55

2018	13,21
2019	13,14

Si analizamos el posible impacto de las variaciones de la temperatura exterior mensual, con las de referencia utilizadas por el software de certificación energética CE<sup>3</sup>X, se observan las siguientes variaciones medias mensuales:



**Figura 74 Desviación de la temperatura exterior registrada respecto de la media considerada por la certificación energética del edificio.**

Las desviaciones no son muy significativas, salvo las efectuadas durante el año 2018 en los meses de febrero, marzo y junio. Si bien no se observa que correspondan los descensos de temperatura con el aumento en el consumo general.

Análogamente al procedimiento realizado en el apartado anterior, y que corresponde al edificio denominado EDIFICIO 1, se realizan las mismas operaciones, de medición y de análisis de consumos, obteniendo los resultados que se muestran de forma tabulada en los apartados 4.1.2.1 y 4.1.2.2.

Tal y como se había subdividido en los apartados 3.2.1.1 y 3.2.1.2, analizamos por un lado, edificios en los que se realiza un cambio de tecnología, pero **no se incorpora un sistema de gestión técnica** de las instalaciones acorde a la nueva tecnología implementada (EDIFICIOS TIPO 1). Por otro lado, analizamos edificios que **han modificado el diseño y tecnología**, pasando a trabajar a menor temperatura, y además disponiendo de un sistema de gestión técnica de las instalaciones, que aproveche la instalación para trabajar a bajas temperaturas el mayor tiempo posible (EDIFICIOS TIPO 2).

#### 4.1.2.1 ANÁLISIS DE DESVIACIONES EN EDIFICIOS TIPO 1

A continuación, se analizan los resultados de los edificios denominados “Tipo 1” y que presentan actuaciones de reforma de generación térmica **manteniendo el diseño actual** y con una regulación sencilla que solo gestiona una válvula de 3 vías mediante una simple curva de temperatura para cada circuito de calefacción.

La regulación por curva de calefacción consiste en modificar la temperatura de impulsión de un circuito de calefacción, tomando como base la referencia de la temperatura exterior.

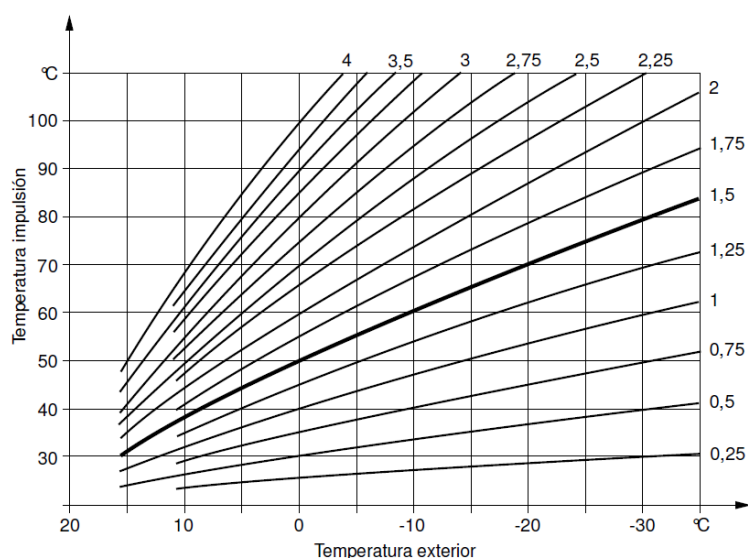


Figura 75. Curva de regulación de temperatura de impulsión utilizada en el sistema de regulación. Ajuste 2,25.

Dentro de esta tipología podemos encontrar los siguientes edificios:



TIPOLOGÍA	Nombre	Ubicación
Tipo 1	Edificio 1: Urbanización Los Tilos.	Santiago de Compostela.
	Edificio 2: Edificio de 24 viviendas	Puentedeume. La Coruña.
	Edificio 5: Edificio de 66 viviendas	La Coruña.
	Edificio 6: Residencial en la costa de Lugo	Viveiro. Lugo.

La siguiente tabla resume los datos principales obtenidos en los últimos años, destacando el rendimiento estacional anual (R.E.A) obtenido, fruto de la comparación entre el combustible consumido y la energía térmica real generada.

**Tabla 20. Tabla resumen de consumos y rendimientos observados, edificio 1.**

EDIFICIO 1: URB. LOS TILOS	RENDIMIENTO ESTACIONAL ANUAL Y CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE					
	AÑO	CONSUMO ENERGÍA UTIL [kWh/año]	CONSUMO GAS [kWh/año]	R.E.A [%]	CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/año]	Consumo [kWh/m²año]
	2017	86.100,00	98.954,00	87,01	117.755,43	50,26
	2018	105.690,00	125.225,00	84,40	149.017,89	63,60
	2019	98.630,00	116.008,00	85,02	138.049,52	58,92
	CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PRODUCCIÓN DE ACS					
	AÑO	CONSUMO ENERGÍA ÚTIL PARA PRODUCCIÓN ACS [kWh/año]		CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE ACS [kWh/año]		Consumo ACS [kWh/m²año]
	2017	7.500,00		10.162,62		4,34
	2018	8.475,00		11.838,89		5,05
	2019	9.495,00		13.167,02		5,62
	CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PÉRDIDAS POR TRANSPORTE					
	AÑO	ENERGÍA UTIL PARA RECIRCULACIÓN ACS [kWh/año]		CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE RECIRCULACIÓN ACS [kWh/año]		%
	2017	3.347,50		4.578,24		45,05%
	2018	3.383,00		4.769,87		40,29%
	2019	3.289,00		4.603,52		34,96%

		CONSUMO E.P. NO RENOVABLE [kWh/año]	Superficie [m²]	Consumo inicial [kWh/m²año]
Consumo inicial observado	13.000 litros 28.500 kWh e	213.250,56	<b>2.343,00</b>	<b>91,02</b>
		ACS [kWh/m²año]	CALEFACCIÓN [kWh/m²año]	Consumo estimado [kWh/m²año]
Consumo estimado en CE³X		19,82	140,69	<b>160,51</b>
				Consumo real actual [kWh/m²año]
Consumo real medido	2017	4,34	45,92	50,26
	2018	5,05	58,55	63,60
	2019	5,62	53,30	58,92
	<b>MEDIA</b>	<b>5,05</b>	<b>53,30</b>	<b>58,92</b>

En el caso de este edificio, se observa un ligero aumento en el consumo para la producción de ACS. Con ayuda de las lecturas individuales de consumo de ACS, se ha podido confirmar que esto se corresponde con un aumento real de la demanda real de ACS. Los datos de las pérdidas por recirculación se mantienen constantes.

El consumo inicial que tenía el edificio está muy por debajo del recogido en su certificación energética. Este consumo ha descendido de los 91,02 [kWh/m<sup>2</sup>año] a los 58,92 [kWh/m<sup>2</sup>año] de media.

Resalta la distancia entre la demanda estimada por la certificación en materia de producción de ACS, que lo estima en 19,82 [kWh/m<sup>2</sup>año], y las lecturas reales obtenidas reflejan unos valores de 5,05 [kWh/m<sup>2</sup>año].

Las calderas de condensación instaladas, son modelo BAXI BIOS PLUS 70 E con rendimientos según fichas de características del 105%<sup>22</sup>, si bien, se observa que el rendimiento estacional anual conseguido por esta instalación, no supera el 87%, siendo un rendimiento estacional anual compatible con una caldera prácticamente estándar.

**Tabla 21. Tabla resumen de consumos y rendimientos observados, edificio 2.**

EDIFICIO 2: 24 VIVIENDAS EN PUENTEDEUME

RENDIMIENTO ESTACIONAL ANUAL Y CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE					
AÑO	CONSUMO ENERGÍA UTIL [kWh/año]	CONSUMO GAS [kWh/año]	R.E.A [%]	CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/año]	Consumo [kWh/m²año]
2017	143.491,00	176.496,00	81,30	210.029,88	58,67
2018	150.970,00	182.331,00	82,80	216.973,79	60,61
2019	134.120,00	165.172,00	81,20	196.555,17	54,90
CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PRODUCCIÓN DE ACS					
AÑO	CONSUMO ENERGÍA ÚTIL PARA PRODUCCIÓN ACS [kWh/año]		CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE ACS [kWh/año]		Consumo ACS [kWh/m²año]
2017	21.578,00		31.584,77		8,82
2018	20.290,00		29.160,75		8,15
2019	22.860,00		33.501,72		9,36
CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PÉRDIDAS POR TRANSPORTE					
AÑO	ENERGÍA UTIL PARA RECIRCULACIÓN ACS [kWh/año]		CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE RECIRCULACIÓN ACS [kWh/año]		%
2017	4.312,00		6.310,81		19,98%
2018	4.187,00		6.017,12		20,63%
2019	4.600,00		6.741,38		20,12%

		CONSUMO E.P. NO RENOVABLE [kWh/año]	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Consumo inicial [kWh/m <sup>2</sup> año]
Consumo inicial observado	24.500 litros	296.942,94	3.580	<b>82,94</b>
		ACS [kWh/m <sup>2</sup> año]	CALEFACCIÓN [kWh/m <sup>2</sup> año]	Consumo estimado [kWh/m <sup>2</sup> año]

<sup>22</sup> Rendimiento referenciado a P.C.I. (Poder Calorífico Inferior) del gas natural tipo G20.

<b>Consumo estimado en CE<sup>3</sup>X</b>		21,88	74,74	<b>97,26</b>
				<b>Consumo real actual</b> [kWh/m <sup>2</sup> año]
<b>Consumo real Medido</b>	2017	8,82	49,85	58,67
	2018	8,15	52,46	60,61
	2019	9,36	45,55	54,90
	<b>MEDIA</b>	<b>8,82</b>	<b>49,85</b>	<b>58,67</b>

Se observa las bajas pérdidas observadas en la red de recirculación de ACS. Estas no representan más de un 20% de la energía empleada en la producción de ACS. Cabe destacar que el edificio ha ejecutado en la reforma una nueva red de ACS completamente aislada y por el interior del edificio, lo que explica el bajo consumo existente en la red de recirculación.

En este edificio se observan valores iniciales de consumo energético también inferiores a los calculados en la certificación energética, si bien no tan dispares. Se produce una reducción del consumo inicial desde los 82,94 [kWh/m<sup>2</sup>año] a los 58,67 [kWh/m<sup>2</sup>año] de media.

Por otro lado, el rendimiento estacional anual de la instalación no alcanza el **83%**, habiéndose instalado dos generadores de condensación BAXI EUROCONDENS SGB 170 E con rendimientos referenciados a PCI de 106,6%, lo que nuevamente nos viene a confirmar que la distancia entre el rendimiento de los generadores y el estacional anual distan demasiado.

**Tabla 22 Tabla resumen de consumos y rendimientos observados, edificio 5.**

EDIFICIO 5: EDIFICIO DE 66 VIVIENDAS EN LA CORUÑA	RENDIMIENTO ESTACIONAL ANUAL Y CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE					
	AÑO	CONSUMO ENERGÍA UTIL [kWh/año]	CONSUMO GAS [kWh/año]	R.E.A [%]	CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/año]	Consumo [kWh/m²año]
	2017	151.400,00	189.179,00	80,03	225.123,08	41,19
	2018	153.400,00	198.448,00	77,30	236.152,65	43,21
	2019	165.500,00	210.828,00	78,50	250.885,35	45,91
	2020	165.400,00	216.606,00	76,36	257.760,61	47,17
	CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PRODUCCIÓN DE ACS					
	AÑO	CONSUMO ENERGÍA ÚTIL PARA PRODUCCIÓN ACS [kWh/año]		CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE ACS [kWh/año]		Consumo ACS [kWh/m²año]
	2017	96.850,00		144.010,37		26,03
	2018	84.030,00		129.360,54		23,67
	2019	93.930,00		142.390,70		26,06
	2020	92.860,00		144.713,72		26,48
	CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PÉRDIDAS POR TRANSPORTE					
	AÑO	ENERGÍA UTIL PARA RECIRCULACIÓN ACS [kWh/año]		CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE RECIRCULACIÓN ACS		%



		[kWh/año]	
2017	23.603,00	35.096,30	24,37%
2018	21.913,00	33.734,11	26,08%
2019	27.546,00	42.405,87	29,78%
2020	26.259,00	40.922,22	28,28%

		CONSUMO E.P. NO RENOVABLE [kWh/año]	Superficie [m²]	Consumo inicial [kWh/m²año]
Consumo inicial observado	23.000 litros	278.762,76	5.465,00	51,01
		ACS [kWh/m²año]	CALEFACCIÓN [kWh/m²año]	Consumo estimado [kWh/m²año]
Consumo estimado en CE³X		21,6	124,38	146
				Consumo real actual [kWh/m²año]
Consumo real Medido	2017	26,35	14,84	41,19
	2018	23,67	19,54	43,21
	2019	26,06	19,85	45,91
	2020	26,48	20,69	47,17
	MEDIA	26,20	19,70	44,56

En el caso de este edificio, llama enormemente la atención el bajo consumo térmico anual del mismo. Realizando un análisis más profundo, se observa que el consumo de ACS es normal para el volumen del edificio, si bien el de calefacción es muy bajo, incluso inferior al de ACS. Los valores de consumo registrados para la producción de ACS ascienden a 26,20 [kWh/m²año], mientras que los de calefacción son de tan solo 19,70 [kWh/m²año].

Por otra parte, y a la vista de los consumos de los contadores individuales, se observa que la demanda de calefacción solo se produce en muy pocas viviendas, y durante muy pocos días al año. Tras analizar esto y proceder a investigar el motivo, este no se debe al buen aislamiento del edificio, sino que se detecta una influencia externa condicionada por la forma de reparto del consumo en esta comunidad. La factura relativa a consumo de calefacción se reparte **exclusivamente** entre aquellos que hacen uso de la calefacción, y, por lo tanto, penalizando a aquellos que la utilizan. El resultado es que la calefacción no se pone con una consigna de temperatura, sino que se activa por el usuario de forma “excepcional” y solo cuando hace demasiado frío.

**Tabla 23. Tabla resumen de consumos y rendimientos observados, edificio 6.**

EDIFICIO 6: URBANIZACIÓN	RENDIMIENTO ESTACIONAL ANUAL Y CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE					
	AÑO	CONSUMO ENERGÍA UTIL [kWh/año]	CONSUMO GAS [kWh/año]	R.E.A [%]	CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/año]	Consumo [kWh/m²año]
	2017	115.128,00	102.885,00	111,90	122.432,82	9,79
	2018	72.155,00	89.047,00	81,03	105.966,25	8,47

2019	77.906,00	94.845,00	82,14	112.866,01	9,02
CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PÉRDIDAS POR TRANSPORTE					
AÑO	CONSUMO ENERGÍA UTIL kWh/año	CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE (kWh/año)			(%)
2017	No se dispone de la información.				
2018					
2019					

		<b>CONSUMO E.P. NO RENOVABLE</b> [kWh/año]	<b>Superficie</b> [m <sup>2</sup> ]	<b>Consumo inicial</b> [kWh/m <sup>2</sup> año]
<b>Consumo inicial observado</b>	15.000 litros	181.801,80	<b>12.511,00</b>	<b>14,53</b>
		<b>ACS</b> [kWh/m <sup>2</sup> año]	<b>CALEFACCIÓN</b> [kWh/m <sup>2</sup> año]	<b>Consumo estimado</b> [kWh/m <sup>2</sup> año]
<b>Consumo estimado en CE<sup>3</sup>X</b>		27,82	62,70	<b>90,60</b>
				<b>Consumo real actual</b> [kWh/m <sup>2</sup> año]
<b>Consumo real Medido</b>	2017		122.432,82	9,79
	2018		105.966,25	8,47
	2019		112.866,01	9,02
	<b>MEDIA</b>			<b>9,09</b>

En el caso de este edificio no se ha dispuesto de información de las pérdidas por transporte. Si bien con los resultados obtenidos, se puede concluir que su ocupación es muy baja, tal y como se reduce del consumo real observado en los últimos 3 años. Se observa también que las actuaciones realizadas han rebajado el consumo inicial de 14,53 [kWh/m<sup>2</sup>año], a los actuales 9,09 [kWh/m<sup>2</sup>año].

Cabe destacar el error detectado durante el periodo de lectura del año 2017, donde se puede observar que el nivel de rendimiento estacional anual de la instalación, era superior al **111%**. En este edificio los generadores son del tipo “Baja Temperatura” y no de condensación. Por este motivo, el rendimiento máximo de estas calderas no supera el 93%, y obtener valores anuales de 111%, por lo tanto, tecnológicamente no era factible.

Tras el análisis de los datos, y descartar que las lecturas del contador fuesen erróneas, el software y la base de datos no tuviesen ningún error, etc., se detectó el error provenía de un fallo en la regulación de las calderas.

La colocación del contador de energía se realizó entre el tanque de inercia y la generación, tal y como puede observarse en la Figura 76, donde se ubica el caudal metro del contador en retorno.



**Figura 76.** Se muestra ubicación del contador de energía entre la generación y la inercia.

Dado que la instalación dispone de un único contador de energía y ambas calderas pueden trabajar indistintamente, cuando una caldera genera es leída la energía que se transfiere al tanque de inercia, si bien, una vez finalizada la secuencia, la circuladora del primario de caldera mantiene una temporización para seguir evacuando calor residual del hogar de la caldera, sin tener en cuenta la temperatura del cuerpo de la caldera, ni la de impulsión, ni la de retorno. Por este motivo, al no disponer de una regulación adecuada, la energía que se transfirió (y fue registrada por el contador) vuelve a medirse en sentido contrario, procediendo a recalentar el cuerpo de la caldera con la energía almacenada en la inercia.

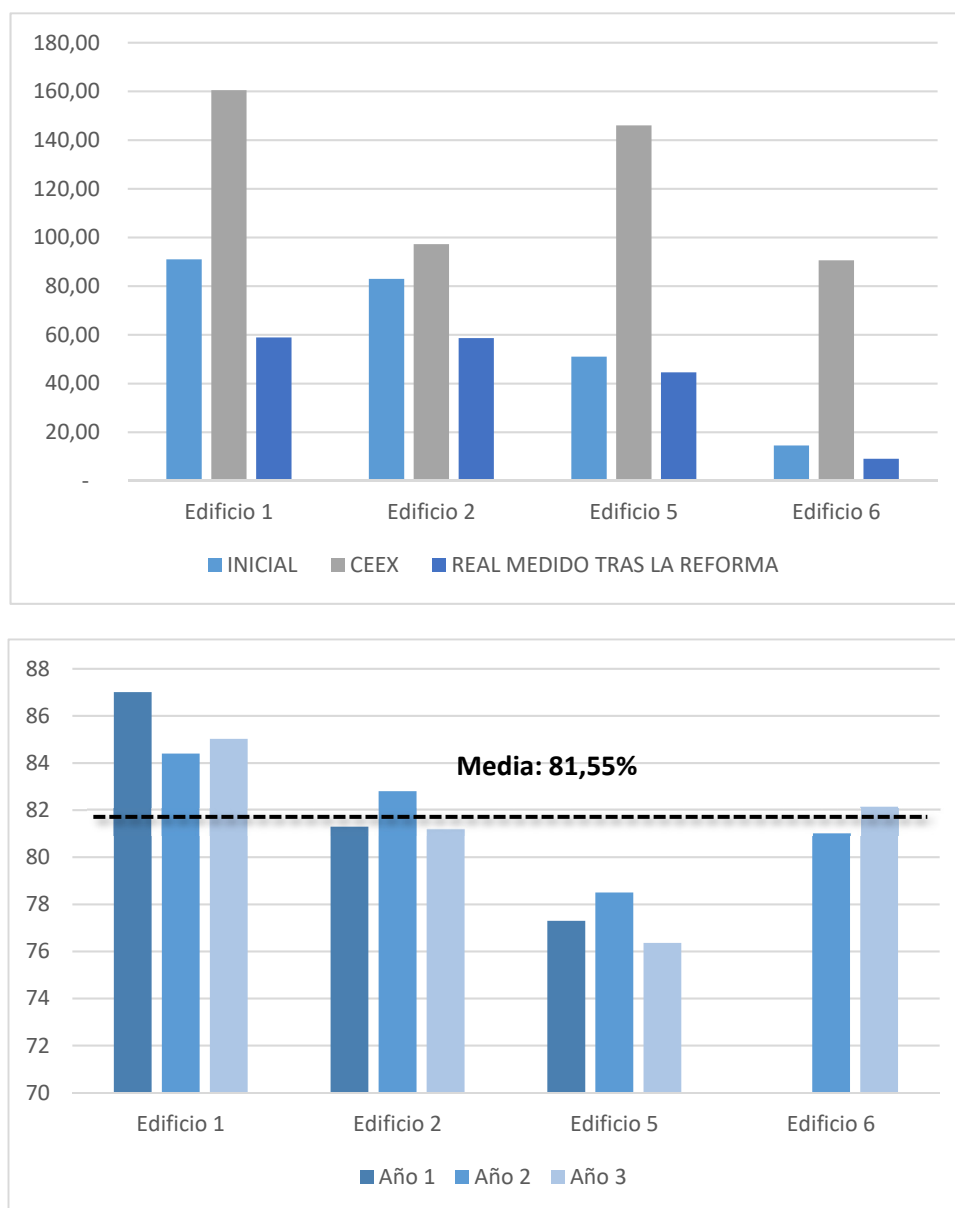
Este hecho, provoca un error en la lectura de energía, ya que se cuenta dos veces parte de la energía, y además provoca grandes pérdidas al disipar la energía en el hogar de la caldera.

Subsanado ese valor del año 2017, se observa que el rendimiento estacional de esta instalación es cercano al 82%. En la figura siguiente se resume de forma gráfica los valores de R.E.A. obtenidos en cada instalación en los últimos años.

Se concluye, por tanto, de los datos recogidos en las instalaciones de los edificios Nº 1, 2, 5, y 6, que:

- 1) por un lado, que existen desviaciones muy notables entre los valores recogidos en las certificaciones energéticas, y los valores reales consumidos por los edificios. Todos los edificios muestran unos valores de consumo estimados en la certificación final, mayores que los que realmente venían consumiendo antes de la reforma.

- 2) La reducción del consumo energético inicial y el final obtenido tras la reforma, se produce en todos los casos como era de esperar.



**Figura 77. Resumen de consumos y REA obtenidos de edificios TIPO 1, sin sistema de gestión técnica instalado. Fig. Superior: Consumo energético inicial - estimado y medido. Fig. Inferior: Distribución del rendimiento estacional anual.**

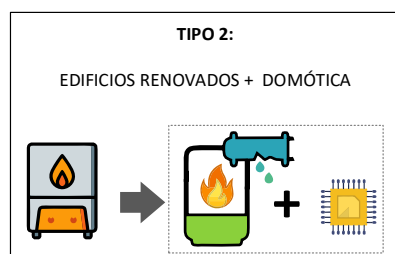
#### 4.1.2.2 ANÁLISIS DE DESVIACIONES EN EDIFICIOS TIPO 2

En este epígrafe se enumeran los edificios denominados “Tipo 2”. Se trata de edificios en los que las actuaciones de reforma de generación térmica se han realizado **modificando el diseño de la sala**, incorporando

una regulación acorde a los nuevos generadores de condensación a gas, haciendo que además de gestionar las demandas de energía, se busque la mayor eficiencia de los generadores y esto se consigue, por ejemplo:

- 1) Rediseñando la sala para producción instantánea de ACS en lugar de acumulación.
- 2) Intercambiadores de placas adecuados para saltos térmicos de 1 o 2 °C, lo que nos permite producir ACS a 55 °C con temperaturas de primario de 56-58 °C.
- 3) Bombas circuladoras variables con regulación 0-10V o PWM, que permiten al sistema de regulación modular el caudal de primario garantizando un salto térmico que favorezca la condensación.
- 4) La regulación debe intentar mantener una temperatura constante y no inferior a 55°C en la inercia, subiendo esta lo menos posible y solo en casos en los que la demanda de calefacción según temperatura exterior sea necesaria.
- 5) Gestión adecuada de ciclos de arranque y parada de los generadores, minimizando, con la modulación de las calderas y de las bombas circuladoras, las paradas de quemadores.

Por todo ello se procede a resumir los principales datos de cada instalación que fue reformada teniendo en cuenta estas premisas, incorporando una regulación y gestión adecuada de la energía con el objetivo de optimizar la eficiencia energética de la tecnología de condensación.



TIPOLOGÍA	Nombre	Ubicación
Tipo 2	Edificio 3: Urbanización tipo District Heating	Lugo
	Edificio 4: District Heating de 112 viviendas	La Coruña.
	Edificio 7: Edificio residencial de 76 viviendas	La Coruña.

**Tabla 24. Tabla resumen de consumos y rendimientos observados, edificio 3.**

EDIFICIO 3: URBANIZACIÓN TIPO DISTRICT HEATING EN	RENDIMIENTO ESTACIONAL ANUAL Y CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE				
	AÑO	CONSUMO ENERGÍA UTIL [kWh/año]	CONSUMO GAS [kWh/año]	R.E.A [%]	CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/año]
	2016	734.400,00	824.983,00	89,02	981.729,95
	2017	761.000,00	835.988,00	91,03	994.825,88
	2018	694.100,00	773.974,00	89,68	921.029,21
	2019	658.900,00	725.182,00	90,86	862.966,10
CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PÉRDIDAS POR TRANSPORTE					

	AÑO	CONSUMO ENERGÍA UTIL POR TRANSPORTE [kWh/año]	CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/año]	(%)
	2016	282.665,00	377.860,42	38,49%
	2017	222.774,00	291.223,84	29,27%
	2018	245.977,00	326.396,78	35,44%
	2019	308.725,00	404.339,37	46,85%

		CONSUMO E.P. NO RENOVABLE [kWh/año]	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Consumo inicial [kWh/m <sup>2</sup> año]
Consumo inicial observado	100.000 litros 167.525 kWh e	1.539.355,85	8.160,00	188,65
		ACS [kWh/m <sup>2</sup> año]	CALEFACCIÓN [kWh/m <sup>2</sup> año]	Consumo estimado [kWh/m <sup>2</sup> año]
Consumo estimado en CE <sup>3</sup> X				201,80
				Consumo real actual [kWh/m <sup>2</sup> año]
Consumo real Medido	2017		981.729,95	120,31
	2018		994.825,88	121,91
	2019		921.029,21	112,87
	2020		862.966,10	105,76
	MEDIA			116,59

En el caso de este edificio, la reforma planteada parte de un conjunto de edificios que solo disponían de servicio central de calefacción, por lo que como reforma, se planteó una solución técnica que permitiese dar ambos servicios. La solución consistió en tender un colector general **primario de calefacción** con estaciones de transferencia en cada vivienda que permitan la entrada de agua a radiadores o la producción de ACS mediante intercambiador de placas. Por este motivo no se dispone de red separada de ACS y de calefacción. Como posible desventaja, este colector primario deberá estar disponible las 24 horas del día los 365 días del año. Llama la atención el ahorro producido entre el consumo inicial 188,65 kWh/m<sup>2</sup>año que solo disponía de 6 horas de calefacción, y el medido tras la reforma 116,59 kWh/m<sup>2</sup>año con servicio 24h y de ACS.

El sistema de regulación mantiene el tanque de inercia a una temperatura mínima de 55 °C en verano e invierno, si bien, dada la climatología de la zona, con temperaturas de frío exterior elevado, las curvas de regulación solicitarán una impulsión a mayor temperatura, haciendo que la inercia suba su temperatura hasta alcanzar la más desfavorable demandada, del edificio más expuesto. Esta circunstancia no se produce durante periodos muy largos de tiempo y por ello se puede observar niveles de rendimiento estacional anual bastante elevados.

Se observa un nivel de rendimiento estacional elevado superior al 91%. La regulación mantiene la inercia a una temperatura mínima de 56-58 °C, con esta temperatura se garantiza la condensación de las calderas.

A pesar de requerir una red de recirculación en cada edificio, y que debe estar disponible los 365 días y las 24 horas, las pérdidas por transporte de energía han resultado ser reducidas, siendo además importante resaltar que salvo dos tramos muy cortos que discurren enterrados en vía pública el resto van por zonas comunes del edificio, lo que repercute en que la energía de transporte, se quede en el interior del edificio.

Tabla 25. Tabla resumen de consumos y rendimientos observados, edificio 4.

EDIFICIO 4: DISTRICT HEATING DE 112 VIVIENDAS EN LA CORUÑA

RENDIMIENTO ESTACIONAL ANUAL Y CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE					
AÑO	CONSUMO ENERGÍA UTIL [kWh/año]	CONSUMO GAS [kWh/año]	R.E.A [%]	CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/año]	Consumo [kWh/m²año]
2017	687.910,00	739.529,00	93,02	871.904,85	71,65
2018	711.190,00	772.109,00	92,11	910.317,02	74,81
2019	738.730,00	804.717,00	91,80	948.761,08	77,97
CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PRODUCCIÓN DE ACS					
AÑO	CONSUMO ENERGÍA ÚTIL PARA PRODUCCIÓN ACS [kWh/año]		CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE ACS [kWh/año]		Consumo ACS [kWh/m²año]
2017	256.890,00		328.638,03		27,01
2018	264.420,00		341.613,07		28,07
2019	260.300,00		337.425,93		27,73
CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PÉRDIDAS POR TRANSPORTE					
AÑO	ENERGÍA RECIRCULACIÓN ACS kWh/año		CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE RECIRCULACIÓN ACS kWh/año		%
2017	20.421,00		26.124,48		7,95%
2018	24.750,00		31.975,36		9,36%
2019	25.788,00		33.428,89		9,91%

		CONSUMO E.P. NO RENOVABLE [kWh/año]	Superficie [m²]	Consumo inicial [kWh/m²año]
Consumo inicial observado	1.600.000 kWh/año gas	1.886.400	8956+3213	<b>155,01</b>
		Torre 1 [kWh/año]	Torre 2 [kWh/año]	Consumo estimado [kWh/m²año]
Consumo estimado en CE³X		1.302.202	248.044	<b>127,39</b>
				Consumo real actual [kWh/m²año]
Consumo real Medido	2017		871.904,85	71,65
	2018		910.317,02	74,81
	2019		948.761,08	77,97
	MEDIA			<b>74,81</b>

El edificio Nº 2, tiene la consideración de distric heating al alimentar a dos edificios de propiedades diferentes. La distribución de cada servicio se hace de forma separada con un circuito para calefacción y otro



para ACS. Del estudio de este edificio se observa unas pérdidas por transporte de ACS muy bajas lo que hace desconfiar de la lectura de dichos contadores.

El diseño y la regulación, se han rediseñado para ajustarlos a temperaturas compatibles con la condensación. La climatología también ayuda a necesitar momentos muy puntuales temperaturas elevadas durante el invierno, haciendo que se trabaje la mayor parte del año con la inercia a 58°C. Con 58°C de inercia se produce ACS a temperaturas de impulsión de 53 -55°C, haciendo que las calderas condensen todo el año, para dar ambos servicios de ACS y calefacción. El resultado como puede extraerse es de un R.E.A. superior al 92%.

Tabla 26. Tabla resumen de consumos y rendimientos observados, edificio 7.

EDIFICIO 7: EDIFICIO DE 76 VIVIENDAS EN LA CORUÑA	RENDIMIENTO ESTACIONAL ANUAL Y CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE					
	AÑO	CONSUMO ENERGÍA UTIL [kWh/año]	CONSUMO GAS [kWh/año]	R.E.A [%]	CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE [kWh/año]	Consumo [kWh/m²año]
	2019	586.550,00	629.886,00	93,12	749.564,54	79,32
	2020	528.740,00	569.763,00	92,80	678.017,89	71,75
	CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PRODUCCIÓN DE ACS					
	AÑO	CONSUMO ENERGÍA ÚTIL PARA PRODUCCIÓN ACS [kWh/año]		CONSUMO ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE ACS [kWh/año]		Consumo ACS [kWh/m²año]
	2019	148.390,00		189.630,69		20,07
	2020	159.110,00		204.031,14		21,59
	CONSUMO DE E.P. NO RENOVABLE DESTINADA A PÉRDIDAS POR TRANSPORTE					
	AÑO	ENERGÍA RECIRCULACIÓN ACS [kWh/año]		CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE RECIRCULACIÓN ACS [kWh/año]		%
	2019	86.062,40		109.980,95		58,00%
	2020	81.622,90		104.667,30		51,30%

		CONSUMO E.P. NO RENOVABLE [kWh/año]	Superficie [m²]	Consumo inicial [kWh/m²año]
Consumo inicial observado	58.000 litros	702.966,96	9.450	74,39
		ACS [kWh/m²año]	CALEFACCIÓN [kWh/m²año]	Consumo estimado [kWh/m²año]
Consumo estimado en CE³X		22,39	47,95	70,30
				Consumo real actual [kWh/m²año]
Consumo real Medido	2017	20,07	59,25	79,32
	2019	21,59	50,16	71,75
	MEDIA	20,83	54,70	75,53

En el caso del edificio 7, se trata de un edificio que tan solo ha modificado la sala de calderas, manteniendo las columnas actuales de calefacción y ACS. La distribución de calefacción se realiza mediante múltiples columnas lo que impide la medición, regulación y control por vivienda.

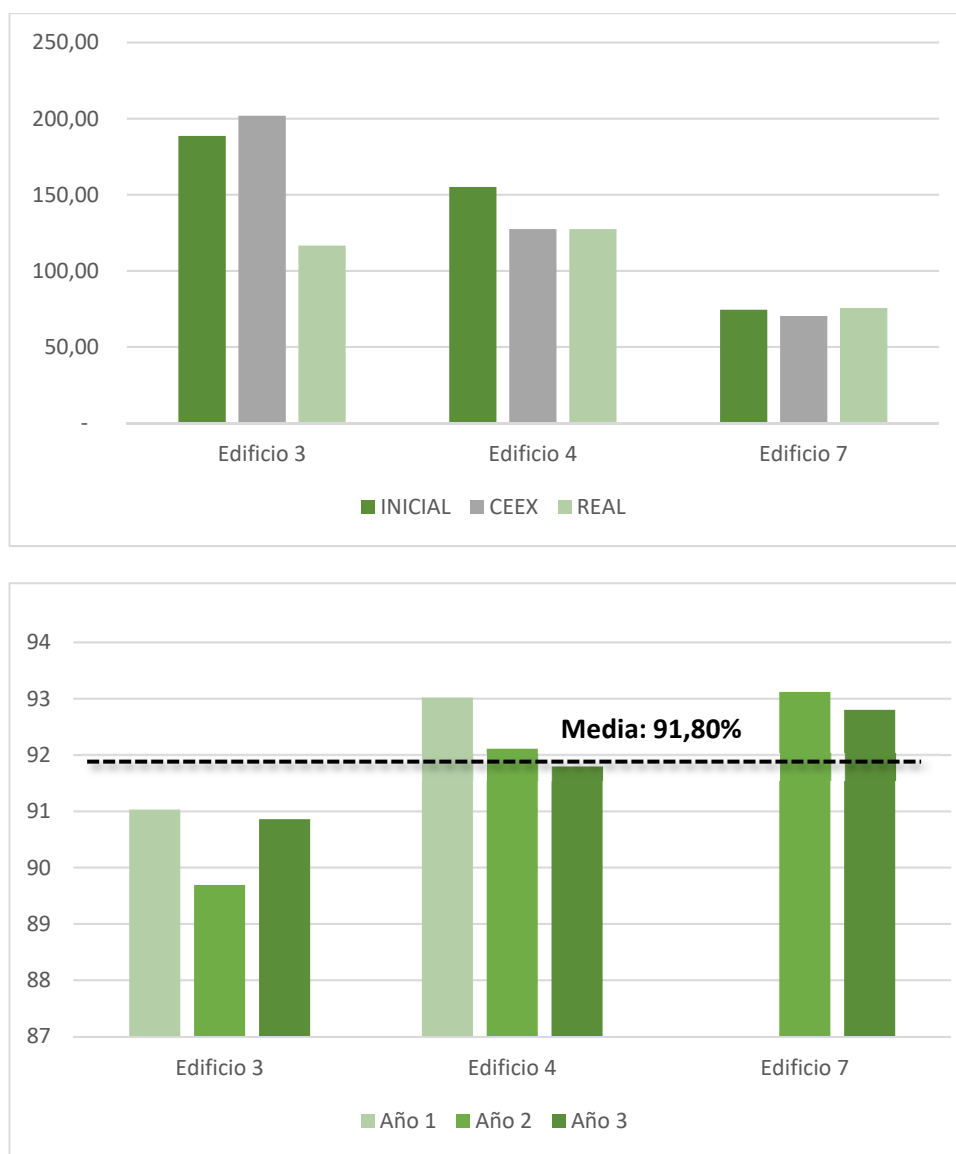
En el diseño se ha contemplado la instalación de válvulas termostáticas en cada radiador, haciendo que las estancias que alcancen la temperatura de confort, cierren el radiador y dejen de demandar tanto caudal a la sala, provocando un ahorro energético al reducir la demanda. Esta circunstancia claramente provoca una reducción de la demanda, pero no aparece recogida en ningún elemento de evaluación de la certificación energética de un edificio.

El diseño y regulación de la sala buscan maximizar la temperatura de condensación, mantener la inercia a temperaturas no superiores a 58°C salvo en momentos de demanda de calefacción con temperaturas exteriores muy bajas. El resultado se observa que, a pesar de disponer de una hidráulica antigua, sin aislamiento y con muy poca capacidad de regulación, se consigue producir con REA superior al 92%.

Las pérdidas por transporte de ACS son consecuencia de mantener la red de ACS existente y que carece de un correcto aislamiento térmico.

En el edificio, además de las actuaciones en la generación térmica, se ha acometido una obra de adecuación de la fachada que ha reducido notablemente la demanda energética al incorporar una fachada ventilada exterior con aislamiento. Esto también afecta considerablemente a la precisión de la certificación, al no tratarse la envolvente con valores (Por defecto) y disponer del parámetro de transmitancia térmica del fabricante de la fachada.

De los datos recopilados en esta tipología de instalaciones (Tipo 2), se observa como principal denominador común los resultados obtenidos a nivel de rendimiento estacional anual que como pueden apreciarse en la Figura 78, se obtienen unos valores porcentuales medios de un 92% frente a los valores medios de las instalaciones tipo 1 que rondan los valores medios de un 81,5 %. Estas diferencias se observan siendo instalaciones que disponen de idéntica marca y modelos de calderas, lo que descarta que la influencia en el REA pudiese venir de las características técnicas de los generadores.



**Figura 78.** Resumen de consumos y REA obtenidos de edificios TIPO 2, con sistema de gestión técnica instalado. Fig. Superior: Consumo energético inicial - estimado y medido. Fig. Inferior: Distribución del rendimiento estacional anual.

## 4.2 MODELADO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO

A continuación, se procede a diseñar un modelo de edificios basado en los parámetros técnicos de la envolvente e instalaciones del mismo, así como recogiendo también las diferentes posibilidades de actuación (*fachadas, combustibles, generadores, carpintería, etc.*), de manera que podamos obtener un modelo energético actual, con los diferentes vectores de cambio. De esta manera se podrá obtener el modelo modificado en valor energético y económico. Esto nos permitirá maximizar la inversión económica en eficiencia, consiguiendo obtener el óptimo energético y el óptimo económico.

#### 4.2.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MONTECARLO

De los datos obtenidos durante 3 años, en algunos edificios como el detallado en el apartado 4.1.2, se concluyó que existen diferencias importantes respecto a la demanda energética calculada. Respecto a las causas de esta desviación, parámetros como la ocupación del edificio y variables ambientales como temperatura exterior, climatología, etc. han sido analizados. En este sentido, continuamos el presente estudio, con el objetivo de analizar el efecto de la temperatura exterior sobre las indicaciones estándares mediante el método de Monte Carlo. Esta metodología iterativa, nos permitirá analizar el impacto de múltiples variables en la eficiencia energética del edificio, y nos permitirá mostrar la mejor opción de actuaciones para alcanzar la optimización energética.

Se parte de la modelización del método de certificación energética mediante hojas de cálculo y de su comparación con los resultados obtenidos por el software CE<sup>3</sup>X, observando que las desviaciones entre ambos son mínimas, tal y como se ha demostrado en apartados anteriores. Posteriormente, la aplicación del método de Monte Carlo sobre este estándar nos permitirá obtener miles de certificaciones energéticas y la campana de Gauss obtenida nos permitirá definir un modelo matemático que relaciona los principales parámetros de actuación con el coste de las mismas y obtener directamente el nuevo consumo energético alcanzado.

En este sentido, el edificio objetivo de este estudio se ubica en la provincia de La Coruña, con los datos procedentes de las estaciones meteorológicas (temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), temperatura de bulbo seco (Tdry bulbo), humedad relativa (RH)) obtenido del estándar DB-HE1 mostrado en Tabla 27.

**Tabla 27. Datos ambientales de la zona de ubicación del edificio objeto del estudio.**

<b>C1</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep.</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
Tª seca	<b>8,19</b>	<b>9,31</b>	<b>10,82</b>	<b>12,33</b>	<b>15,60</b>	<b>16,09</b>	<b>19,29</b>	<b>19,28</b>	<b>17,15</b>	<b>16,08</b>	<b>11,31</b>	<b>8,87</b>
HR %	74,79	64,63	60,20	57,49	57,35	47,05	40,23	42,15	49,73	62,74	70,58	73,88
Tª min	4,61	4,03	5,11	6,91	9,65	9,01	11,93	12,29	11,13	11,12	6,98	5,22
Tª max	11,75	14,16	15,89	17,01	20,49	21,66	25,33	25,55	22,40	20,89	15,48	12,66

Como se puede apreciar en la Tabla 27, los datos de temperatura exterior pueden oscilar entre el valor mínimo y máximo registrado. Con el fin de obtener la distribución de probabilidad del consumo de energía para cada opción de actuación en eficiencia diferente, de acuerdo con las indicaciones del método de Monte

Carlo, se modificó el cálculo del consumo de energía del edificio de este valor promedio mensual a uno aleatorio.

Debido a este proceso aleatorio, se obtuvo una campana de Gauss del consumo de energía para cada posible actuación en eficiencia. En particular, tras un mínimo de 200 iteraciones, definido este número de acuerdo con resultados de trabajos de investigación previos [94], y [95], se puede realizar un análisis energético de la distribución del consumo de energía, respetando el valor propuesto por el software CE<sup>3</sup>X para los valores constantes de temperatura exterior, reflejada a modo de ejemplo en la Figura 79.

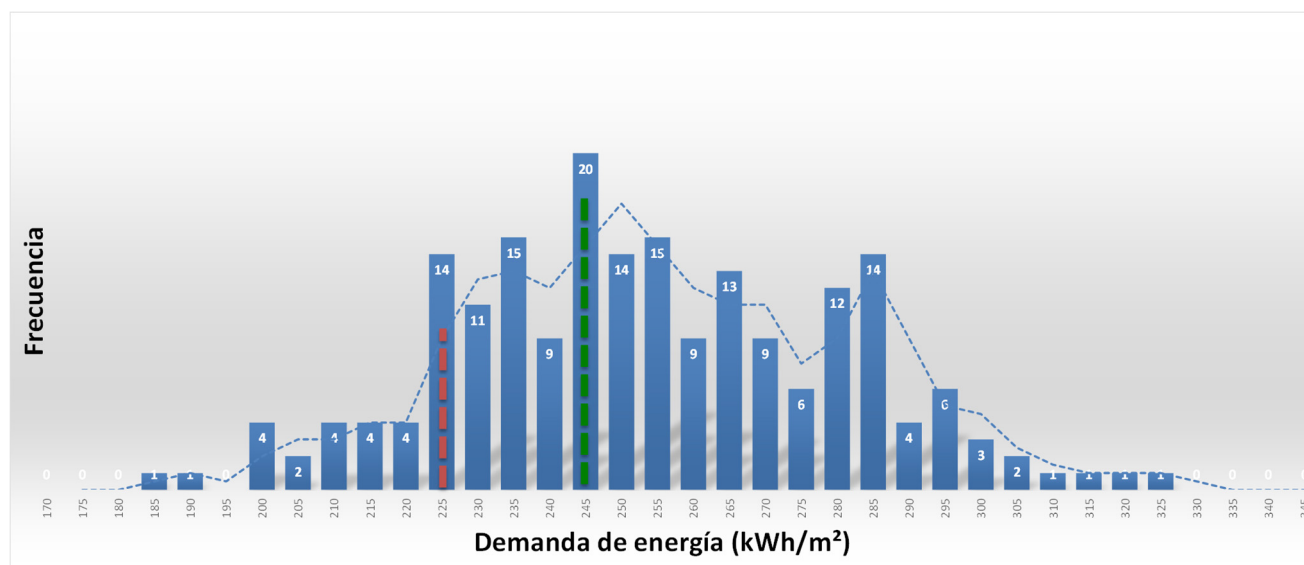


Figura 79. Distribución de la probabilidad de la demanda energética.

Por un lado, en el momento de elaborar la certificación energética de este edificio, se seleccionó un valor estático de temperaturas secas definidas por el código técnico de edificación español Tabla 27, 0,63 renovaciones/hora y permeabilidad de ventana de categoría 2 (27 m³/h m²) y se ha obtenido un valor base de 224 kWh/m².

INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES					
<div><div>&lt; 24.2 A</div><div>24.2-39.2 B</div><div>39.2-60.7 C</div><div>60.7-93.4 D</div><div>93.4-200.0 E</div><div>200.0-226.0 F</div><div>≥ 226.0 G</div></div>	<div>224.5 F</div>	CALEFACCIÓN		ACS			
		Energía primaria calefacción [kWh/m² año]	E	Energía primaria ACS [kWh/m² año]	G		
		173.41		51.04			
		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN			
		Consumo global de energía primaria no renovable [kWh/m² año]		Energía primaria refrigeración [kWh/m² año]	-	Energía primaria iluminación [kWh/m² año]	-
				0.00		-	

Por otro lado, si se emplea una temperatura de bulbo seco libre aleatoria entre los valores mínimo y máximo registrados en la estación meteorológica los últimos años, la distribución de frecuencias describe una campana de Gauss centrada en 245 kWh / m<sup>2</sup>. Esta diferencia muestra la necesidad de un análisis de las causas de la desviación como se hará en la sección de discusión.

Continuando esta fase de análisis, se ha propuesto utilizar el método Monte Carlo al modelo de edificación con el fin de observar el impacto de las medidas de eficiencia disponibles y obtener un método de optimización que maximice la eficiencia, minimizando la inversión. Para ello, se proponen diferentes posibilidades de actuación en el edificio como, por ejemplo:

- **Carpintería** (ACH): categoría 1, 2 o 3 (50, 27 y 9 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>, respectivamente)
- Transmitancia de **fachada** (UF) 1,69, pudiendo mejorar hasta 1,1 o incluso 0,59 W / m<sup>2</sup> K
- Transmitancia de **cubierta** (UC) 2,27 y puede mejorar a 1 o incluso 0,45 W / m<sup>2</sup> K;
- **Combustible** (Comb): diésel actual (0), posible cambio a gas natural (1);
- Incorporación de energía **fotovoltaica** (FV): Desde 0 (actual), 5, 10, 20, hasta 25,00 kWp (Máximo).

Para determinar el impacto de cada medida y el impacto de cada una de las posibles combinaciones, se ha procedido a establecer la matriz de combinaciones empleándose en cada una de ellas el método de Monte Carlo para determinar el valor promedio de la probabilidad de consumo y su coste económico relacionado. Este trabajo requiere el estudio de cada una de las actuaciones, valorar su presupuesto y finalmente generar simulaciones aleatorias de cada combinación. El resultado se resume en la Tabla 28.

**Tabla 28 Tabla resumen de actuaciones de eficiencia y coste de cada una.**

TEST	ACH (m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup> )	UF (W/m <sup>2</sup> K)	UC (W/m <sup>2</sup> K)	COMB_CALOR (kWh/m <sup>2</sup> año)	COMB_ACS (kWh/m <sup>2</sup> año)	FV kWp	COSTE €
1	50	1,69	2,27	0	0	-	30.950
	27	1,69	2,27	0	0	-	33.950
	9	1,69	2,27	0	0	-	36.950
2	50	1,69	0,45	0	0	-	59.105
	27	1,69	0,45	0	0	-	62.105
	9	1,69	0,45	0	0	-	65.105
3	50	1,69	0,45	1	1	-	87.260
	27	1,69	0,45	1	1	-	90.260
	9	1,69	0,45	1	1	-	93.260
4	50	1,69	2,27	1	1	-	59.105
	27	1,69	2,27	1	1	-	62.105
	9	1,69	2,27	1	1	-	65.105
5	50	1,69	2,27	1	1	-	95.985
	27	1,69	2,27	1	1	-	98.985
	9	1,69	2,27	1	1	-	101.985
6	50	0,55	2,27	0	0	-	152.950
	27	0,55	2,27	0	0	-	155.950

	9	0,55	2,27	0	0	-	158.950
7	50	0,55	0,45	0	0	-	181.105
	27	0,55	0,45	0	0	-	184.105
	9	0,55	0,45	0	0	-	187.105
	9	0,55	0,45	0	0	-	187.105
8	50	0,55	0,45	1	1	-	209.260
	27	0,55	0,45	1	1	-	212.260
	9	0,55	0,45	1	1	-	215.260
	9	0,55	0,45	1	1	-	215.260
9	50	1,69	0,45	1	1	-	95.985
	27	1,69	0,45	1	1	-	98.985
	9	1,69	0,45	1	1	-	101.985
	9	1,69	0,45	1	1	-	101.985
10	50	0,55	0,45	1	1	-	217.985
	27	0,55	0,45	1	1	-	220.985
	9	0,55	0,45	1	1	-	223.985
	9	0,55	0,45	1	1	-	223.985
11	50	1,69	2,27	0	0	25,00	60.950
	27	1,69	2,27	0	0	25,00	63.950
	9	1,69	2,27	0	0	25,00	66.950
	9	1,69	2,27	0	0	25,00	66.950
12	50	1,69	2,27	0	0	12,50	45.950
	27	1,69	2,27	0	0	12,50	48.950
	9	1,69	2,27	0	0	12,50	51.950
	9	1,69	2,27	0	0	12,50	51.950
13	50	1,69	2,27	1	1	25,00	74.105
	27	1,69	2,27	1	1	25,00	77.105
	9	1,69	2,27	1	1	25,00	80.105
	9	1,69	2,27	1	1	25,00	80.105

Con los resultados de estos experimentos, y con ayuda del software Minitab, se realizó una superficie de respuesta, tratando de obtener un polinomio capaz de determinar los efectos energéticos y económicos de las posibles combinaciones de las diferentes actuaciones de eficiencia que se pueden plantear al edificio. Los polinomios obtenidos se definen mediante las ecuaciones ( 10 ) y ( 11 ) con un factor de determinación de 85,26 % y 97,42%, respectivamente.

$$\text{COSTE} = 254641 - 198 \cdot \text{ACH} - 107018 \cdot \text{UF} - 15,470 \cdot \text{UC} + 29,037 \cdot \text{COMB\_CALOR} + 1200 \cdot \text{FV} + 0,88 \cdot \text{ACH}^2 + 7735 \cdot \text{UC} \cdot \text{COMB\_CALOR} - 1338 \cdot \text{COMB\_CALOR} \cdot \text{FV} \quad (10)$$

$$\text{CONSUMO} = 209 - 0,99 \cdot \text{ACH} - 14 \cdot \text{UF} - 1,9 \cdot \text{UC} - 65,2 \cdot \text{COMB\_CALOR} - 2,46 \cdot \text{PV} + 0,0232 \cdot \text{ACH}^2 + 0,1044 \cdot \text{FV}^2 + 0,075 \cdot \text{ACH} \cdot \text{UF} - 0,09 \cdot \text{ACH} \cdot \text{UC} - 0,596 \cdot \text{ACH} \cdot \text{COMB\_CALOR} + 0,0053 \cdot \text{ACH} \cdot \text{PV} + 14,09 \cdot \text{UF} \cdot \text{UC} + 34 \cdot \text{UF} \cdot \text{Combheat} - 25,16 \cdot \text{UC} \cdot \text{COMB\_CALOR} - 1,239 \cdot \text{COMB\_CALOR} \cdot \text{FV} \quad (11)$$



## 5 DISCUSIÓN

En la presente tesis doctoral, se ha realizado un estudio de campo consistente en una primera fase que parte con el diseño de un sistema de monitorización energética basado en lectura diaria de contadores de energía térmica, eléctrica, de gas, y agua. Estos contadores dispondrán de comunicación mediante protocolo mbus y sus registros se almacenarán en un dispositivo basado en una raspberry pi con una base de datos.

En una segunda fase se han instalado prototipos en diferentes edificios a los que se les ha practicado una reforma de sus instalaciones, y del que se conoce su estado inicial, certificación energética de partida, y su estado final con su certificación energética final. Con la información de partida y con los datos del proyecto de las actuaciones a realizar, se efectuó una clasificación entre edificios

- Tipo 1: en los que realizamos actuaciones, pero no se implemente un sistema de gestión técnica acorde al diseño de la nueva instalación.
- Tipo 2: edificios en los que se realizan actuaciones con un sistema de gestión técnica y un diseño ajustado a los nuevos equipos.

En paralelo a este trabajo se ha construido un modelo energético similar al de los motores de cálculo existentes dentro de las herramientas homologadas por el Ministerio de Industria para la certificación energética de los edificios en España. Este modelo se ha basado en la UNE EN ISO 13.790 y se ha automatizado en Excel con el fin de poder elaborar de forma rápida y precisa certificaciones energéticas sensibles a parámetros ambientales como variaciones de la temperatura exterior mensual. Se ha automatizado en esta herramienta la generación de múltiples iteraciones con el fin de aplicar el método de Montecarlo.

### 5.1 DISCUSIÓN SOBRE MEDICIÓN REAL Y EFECTO DE LA DOMÓTICA

De los datos obtenidos y analizados en el apartado 4.1.2, se observa que existen desviaciones entre los valores de las certificaciones energéticas y las mediciones reales obtenidas en los diferentes edificios objeto de estudio.

En algunos casos, las principales variaciones se atribuyen a variaciones en la ocupación y el uso de estos edificios, quedando reflejado en las lecturas de los contadores generales del edificio. Sin embargo, las desviaciones hacen pensar que quizás no siempre las actuaciones planificadas son las adecuadas. Se deberá estudiar adecuadamente las posibilidades de actuación.

### 5.1.1 DISCUSIÓN SOBRE LAS DESVIACIONES DE LOS VALORES REALES OBTENIDOS

Para analizar las desviaciones entre los valores obtenidos de la certificación del edificio N° 1 y los reales observados en los últimos años, se comienza consultando las temperaturas exteriores promedio obtenidas de la estación meteorológica más cercana. Comparándolas con las utilizadas en el cálculo del programa CE<sup>3</sup>X - como podemos ver en la Tabla 29.

**Tabla 29. Desviación de la temperatura media mensual considerada y la real observada.**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep.	Oct	Nov	Dic
<b>T ext</b>	<b>8,19</b>	<b>9,31</b>	<b>10,82</b>	<b>12,33</b>	<b>15,60</b>	<b>16,09</b>	<b>19,29</b>	<b>19,28</b>	<b>17,15</b>	<b>16,08</b>	<b>11,31</b>	<b>8,87</b>
<b>2017</b>	7,33	9,65	10,59	13,53	15,94	18,18	18,41	18,68	15,71	15,92	10,03	8,36
<b>Variación</b>	-10,44%	3,67%	-2,15%	9,72%	2,20%	12,97%	-4,56%	-3,15%	-8,39%	-1,00%	-11,30%	-5,76%
<b>2018</b>	8,71	6,82	7,93	11,01	13,91	11,99	18,83	19,99	19,34	13,85	10,82	10,44
<b>Variación</b>	6,34%	-26,76%	-26,74%	-10,72%	-10,81%	-25,48%	-2,35%	3,66%	12,80%	-13,88%	-4,31%	17,74%
<b>2019</b>	7,50	10,08	10,56	11,10	14,88	14,97	18,84	18,49	17,52	14,08	10,23	9,44
<b>Variación</b>	-8,36%	8,32%	-2,46%	-9,96%	-4,57%	-7,00%	-2,29%	-4,10%	2,20%	-12,43%	-9,53%	6,46%

<b>Año</b>	<b>Promedio T<sup>3</sup> Exterior [°C]</b>	<b>Promedio T<sup>3</sup> Ext. de referencia [°C]</b>	<b>Desviación respecto CE<sup>3</sup>X [%]</b>	<b>Consumo [kWh/m<sup>2</sup>año]</b>
<b>2017</b>	13,55	13,69	<b>-1,05 %</b>	<b>50,26</b>
<b>2018</b>	13,21	13,69	<b>-2,49 %</b>	<b>63,60</b>
<b>2019</b>	13,14	13,69	<b>-0,52 %</b>	<b>58,92</b>

A partir de la Tabla 29 se observó que los valores de temperatura promedio anual han disminuido en un 1,05% en comparación con el de referencia definido por la norma. Esto implicaría un consumo ligeramente superior al obtenido en la certificación, aunque hemos obtenido para el edificio de referencia **50,26 kWh/m<sup>2</sup>** año durante el 2017, frente al cálculo de 160,51 kWh/m<sup>2</sup>.

Realizando el mismo análisis en el período 2017-2019, se obtuvo que los valores de consumo total anual han aumentado (17,23%) del año 2017 a 2018. En el período 2018-2019, el consumo de energía disminuyó en un 8,63%, mientras que la temperatura media descendió un 0,52%.

Se observó que la temperatura exterior promedio es más o menos constante, disminuyendo levemente cada año, por lo que el leve aumento del consumo registrado en 2018 y 2019 tiene su justificación, ya que se mantiene la demanda y ocupación del edificio.

El dato de mayor desviación es el consumo real de energía primaria no renovable del edificio, que presenta un valor muy inferior al obtenido de la certificación energética, siendo este aproximadamente el 29% de la estimación.

Si analizamos bien el ahorro porcentual calculado entre la certificación inicial y final tenemos:

- 224,5 kWh/m<sup>2</sup> → 160,51 kWh/m<sup>2</sup>

El ahorro debería de ser de un 28,50 %, y el real observado se ha aproximado bastante:

- 67,42 kWh/m<sup>2</sup> → 49,76 kWh/m<sup>2</sup>, es decir un **26,2% de ahorro energético**.

Con relación a los porcentajes de ahorros, sin embargo, vemos que la aproximación establecida entre certificación energética inicial y final, si concuerda con valores reales observados.

Analizando estas mismas desviaciones para el resto de edificios monitorizados, obtenemos los siguientes resultados que se recogen en la Tabla 30.

**Tabla 30. Comparativa entre ahorros estimados por certificación energética y ahorros reales observados tras la medición.**

	CE <sup>3</sup> X INICIAL [kWh/m <sup>2</sup> año]	CE <sup>3</sup> X FINAL [kWh/m <sup>2</sup> año]	Ahorro estimado [%]	Consumo Inicial [kWh/m <sup>2</sup> año]	Consumo Final [kWh/m <sup>2</sup> año]	Ahorro real [%]
<b>Edificio 1</b>	224,50	160,51	<b>28,50%</b>	91,02	58,92	<b>35,26%</b>
<b>Edificio 2</b>	159,10	97,30	<b>38,84%</b>	82,94	58,67	<b>29,27%</b>
<b>Edificio 3</b>	343,68	201,80	<b>41,28%</b>	188,65	116,59	<b>38,20%</b>
<b>Edificio 4</b>	183,67	127,39	<b>30,64%</b>	155,02	74,81	<b>51,74%</b>
<b>Edificio 5</b>	244,50	146,00	<b>40,29%</b>	51,01	44,56	<b>12,64%</b>
<b>Edificio 6</b>	89,80	90,60	<b>-0,89%</b>	14,53	9,09	<b>37,43%</b>
<b>Edificio 7</b>	108,80	70,30	<b>35,39%</b>	74,39	75,53	<b>-1,54%</b>

Con los datos obtenidos en la tabla, y que podemos visualizar gráficamente en la Figura 80, observamos las diferencias existentes entre el ahorro estimado y el finalmente conseguido. En todos los casos se consigue ahorro, tanto si comparamos entre certificaciones iniciales y finales, como si comparamos entre consumos reales antes y después de las actuaciones. En todas, salvo en el caso curioso de los edificios 6 y 7.

En el caso del edificio 6, la certificación energética, antes y después, refleja curiosamente un aumento mínimo de consumo de energía primaria no renovable. La justificación de este resultado viene dada por que

las herramientas de certificación energética cuantifican el cambio como un simple cambio de combustible, por lo que la transformación de combustible, solo afecta al factor utilizado en la conversión de energía primaria no renovable. Dado que los factores de conversión de energía final a primaria no renovable que se aplican y se encuentran recogidos en la tabla del apartado 8 del documento “FACTORES DE EMISIÓN DE CO<sub>2</sub> Y COEFICIENTES DE PASO A ENERGÍA PRIMARIA DE DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA FINAL CONSUMIDAS EN EL SECTOR DE EDIFICIOS EN ESPAÑA” [71], establecen que:

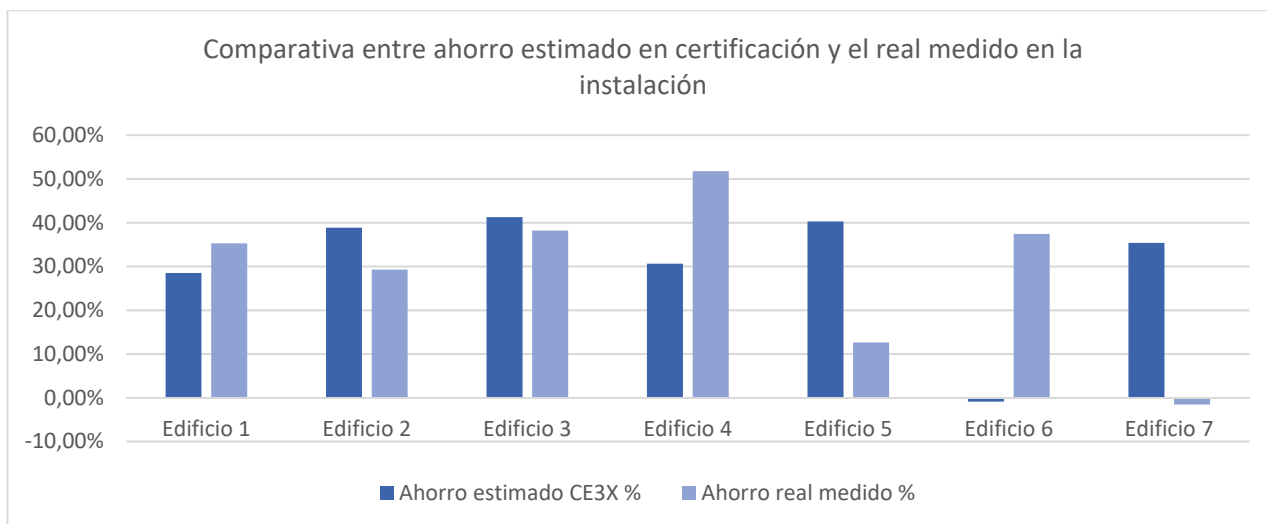
- El factor de conversión de energía gasóleo calefacción: 1,179
- El factor de conversión de energía gas natural: 1,190

siendo por lo tanto un cambio de energía de gasóleo a gas natural, un cambio que implica un 0,9% de incremento en energía primaria no renovable.

La realidad es otra bien distinta, ya que como se puede observar, aunque el cálculo inicial de la certificación establece un aumento en el consumo, vemos que, tras efectuarse la reforma, los años siguientes la instalación ha procedido a reducir el consumo de energía primaria no renovable del orden de un 37%. La consulta a los datos de los contadores de energía individuales nos muestra el número de viviendas ocupadas en los últimos años, este dato nos indica que se pasaron de 26 viviendas ocupadas a 32 en un periodo de 4 años. En este sentido, el edificio aun no alcanza el 30 % de la ocupación total, pero igualmente no se ha reducido la ocupación del edificio, sino todo lo contrario.

Revisando las actuaciones en la instalación, se observa el hecho de que el cambio de quemadores para el nuevo combustible se realizó incorporando módulos electrónicos de regulación que permitiesen hacer modular a los mismos. Esto evita los constantes arranques y paradas. Además, se subsanó otro error detectado en la regulación, que, a pesar de no disponer de un sistema de gestión técnica avanzado, con la medición de energía se detectó que las calderas, temporizaban las bombas circuladoras de primario con la idea de seguir disipando la energía que quedaba en el cuerpo de la caldera. Esta circunstancia hacía que se enfriase el cuerpo muy rápidamente y la temporización tomaba energía del tanque de inercia y la devolvía a las calderas.

La sustitución de este temporizador por una sonda de temperatura que realizase la misma función, pero tipo termostato, subsanó ese error y también eliminó la pérdida de energía que esto ocasionaba. Todas estas actuaciones, unidas a la modulación de los quemadores han hecho que las mismas calderas aumenten considerablemente sus prestaciones estacionales anuales, lo que se ve reflejado en un ahorro de energía primaria no renovable de más de un 35%.



**Figura 80. Comparativa entre ahorro estimado en certificación energética y el real medido en las instalaciones**

En el caso del edificio Nº 7 sucede lo contrario a lo comentado en el edificio 6. Las certificaciones inicial y final reflejan un ahorro superior al 35 %, pero la realidad es que el consumo de energía primaria no renovable ha aumentado ligeramente un **1,54% obteniéndose un ahorro negativo en la gráfica**. El motivo de este aumento en el consumo energético respecto al que se consumía inicialmente, se debe a que el edificio tenía un horario de calefacción de 6 horas diarias, y tras la reforma se ha pasado a un horario extendido de 9 horas de calefacción. Se ha extendido un 33% el servicio de calefacción, pero el consumo prácticamente ha sido el mismo.

Si atendemos a la Figura 78 se observa que el edificio 7 es el que menos desviación se observa entre el consumo inicial, el estimado por la certificación y el real producido, siendo de 74,39 , 70,30 y 75,53 kWh/m<sup>2</sup> año.

Se justifica que el consumo anual no aumente de forma pareja a la extensión del servicio de calefacción, dado que por una parte se han instalado válvulas termostáticas en todos los emisores del edificio, esta actuación reduce considerablemente la demanda cerrando el emisor de la estancia en la que se encuentra, una vez alcanzada la temperatura de confort seleccionada. Esta actuación tampoco se encuentra cuantificada en ningún software de certificación, si bien se trata de un elemento activo en la instalación que provoca un ahorro energético considerable. La estimación de algunos fabricantes es que esta actuación puede representar una reducción entre el 10 y el 15% de la energía anual demandada. Además de esta medida de reducción de la demanda, se ha procedido a instalar los denominados “repartidores de coste” o también llamados “calorímetros”. Se trata de dispositivos de medida adimensional que recogen datos de temperatura de cada

radiador, y temperatura de la estancia, realizando un reparto adimensional establecido en la norma UNE-EN 834:2014, que puede ser utilizado para efectuar un reparto del coste de la calefacción.

Este tipo de dispositivos no provocan de por sí un ahorro energético, ya que no es ningún dispositivo que pueda reducir directamente la demanda como lo es la válvula termostática, si bien se trata de un dispositivo de **ahorro energético psicológico**, ya que el usuario que lo tiene instalado presenta un cambio en su actitud y preocupación por el ahorro energético en la calefacción, procediendo a cerrar aquellos emisores de estancias en las que no se requiere disponer de elevas temperaturas de confort, o regulando las válvulas termostáticas a valores de temperatura que se ajusten a su confort.

La asociación española de repartidores de costes de calefacción AERCCA [96], estima que las instalación de estos dispositivos junto con las válvulas termostáticas puede alcanzar valores superiores al 23% de ahorro, de los datos obtenidos en diversos estudios realizados en España.

Considerando por lo tanto el conjunto de estas actuaciones ( *termostáticas + repartidores* ), unido al nuevo diseño de la sala con regulación que integra un sistema de gestión técnica que maximiza la condensación, tal y como se puede deducir de los rendimientos estacionales anuales superiores al **92,5%** obtenidos y que se visualizan en la Figura 78, se puede justificar que la demanda actual del edificio 75,53 [kWh/m<sup>2</sup> año], se mantenga estable y muy pareja con la inicial registrada antes de las actuaciones y que ascendía a 74,39 [kWh/m<sup>2</sup> año], todo ello a pesar de haber extendido más de un 33% el horario de calefacción.

Analizando ahora el comportamiento del **rendimiento estacional anual** de las diferentes instalaciones, se observa que el análisis claramente es diferenciador entre los edificios que han realizado una simple sustitución de generador por otro de tecnología de condensación (TIPO 1); y aquellos en que se ha establecido un diseño, y regulación acorde con la nueva tecnología de los equipos (TIPO 2).

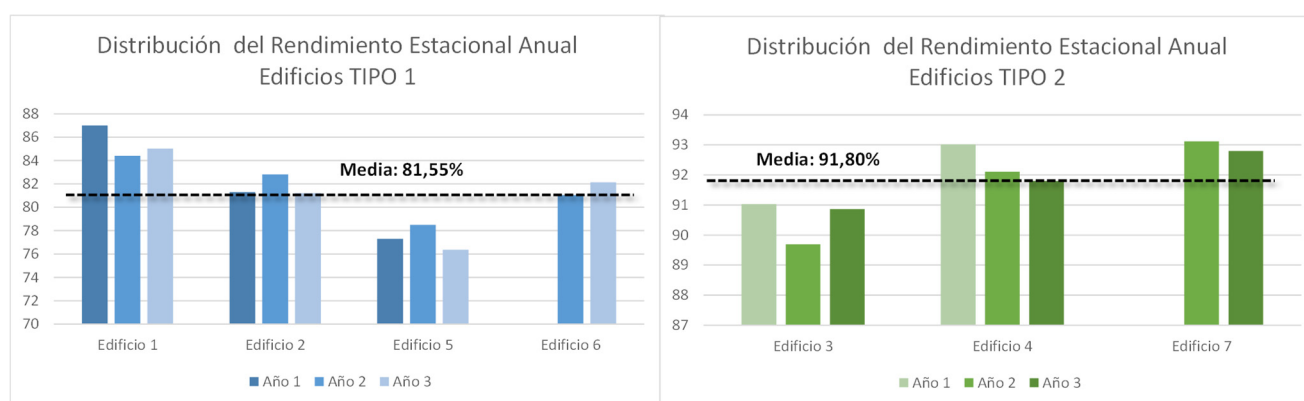
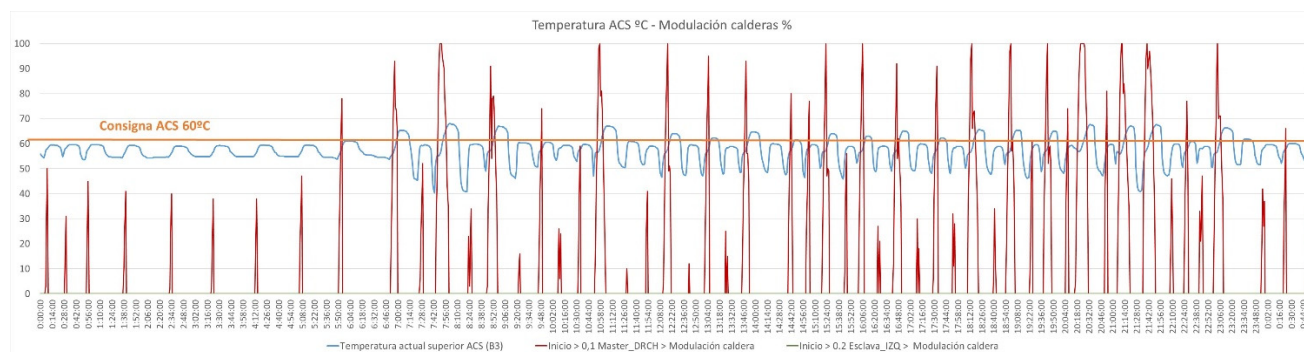


Figura 81. Distribución el REA y valor medio de los edificios Tipo 1 y Tipo 2

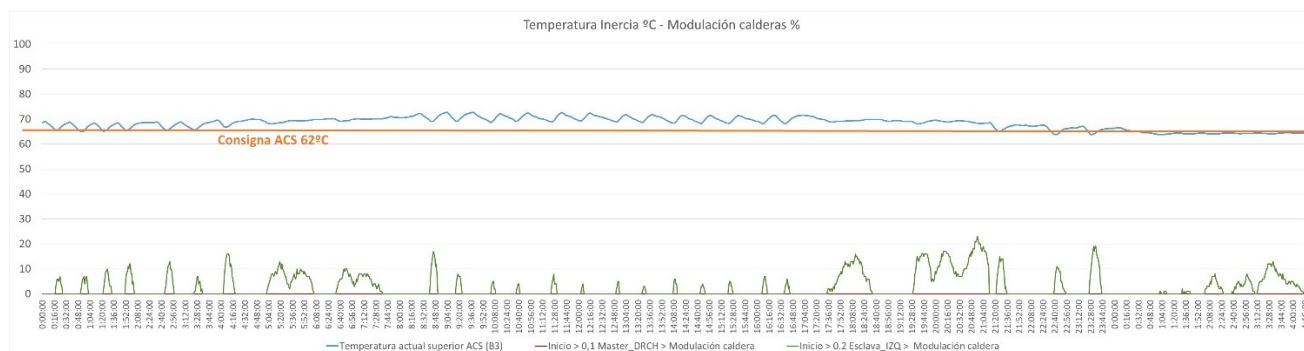
La media de rendimiento estacional anual de los **edificios tipo 1**, ronda el **81,5 %** frente al **91,8 %** alcanzado por los de la tipología 2. A su vez, podemos observar diferencias significativas en cada uno de ellos. El edificio 5, presenta los valores más bajos de rendimiento estacional. El principal motivo claramente es la tecnología de generación del ACS, ya que en ese edificio según se ha podido comprobar, el suministro de calefacción está demandado solo por muy pocos vecinos y durante periodos muy puntuales de tiempo, debido a un problema administrativo interior en el reparto de los costes de calefacción, que hace que el precio que tiene que abonar cada usuario por el servicio de calefacción sea desproporcionado.

La producción de ACS se efectúa mediante tanque de acumulación dotado de un serpentín que es calentado por las calderas. El control de la temperatura de los tanques de ACS se realiza mediante sonda de temperatura. La consigna está en 60 [°C], la regulación de las calderas ante una demanda de ACS hace que se pongan al 100% con el fin de cubrir rápidamente la demanda de calefacción. Al tratarse de un equipo con comunicación, se ha procedido a registrar los arranques y paradas de quemador, su modulación y la temperatura de ACS, obteniéndose los datos que se visualizan en la Figura 82. Podemos observar que, ante una demanda de consumo de ACS, la temperatura de acumulación cae y automáticamente arranca una de las calderas que en la mayor parte de los casos intenta evitar la caída de temperatura modulando hasta el 100% para posteriormente apagarse. Esta “actitud” de la regulación tiene su origen en la regulación rápidamente actúa subiendo la temperatura del agua de primario a 80°C con el fin de comenzar a producir ACS lo antes posible. El hecho de trabajar a esta temperatura, unido a que el servicio de calefacción es utilizado por muy pocos vecinos, pondera a que la mayor parte del tiempo las calderas estén trabajando en este régimen, produciendo un rendimiento estacional muy bajo.



**Figura 82. Evolución de la temperatura de acumulación del ACS y % modulación de calderas en edificio Tipo 1.**

Efectuando el mismo análisis en una instalación **del tipo 2**, en el que el diseño para la producción de ACS se ha diseñado para su trabajo a baja temperatura, se procede a graficar durante 24 horas la producción de ACS. De dichas prestaciones se observa que prácticamente durante todo el día al menos un generador está encendido, modulando para cubrir las puntas de ACS y calefacción, pero sin efectuar los bruscos arranques y paradas que se obtuvieron en el edificio Nº 5 de la tipología 1. Se observa que los picos máximos de modulación del quemador no superan el 25%, se mantienen en el tiempo y procurando secuencias mucho más distanciadas que las obtenidas en la producción de ACS convencional. Por otro lado, se observa que la estabilidad de la inercia es mucho mayor que la que presenta la temperatura acumulada de ACS.



**Figura 83. Evolución de la temperatura de inercia y % modulación de calderas en edificio Tipo 2.**

### 5.1.2 ESTUDIO DE POSIBILIDADES DE ACTUACIÓN EN EFICIENCIA.

En los últimos años, uno de los grandes retos de todos los países europeos es el de cumplir los objetivos que la Directiva de Eficiencia Energética de Edificios (2010/31/EC) que marca como fecha de inicio el año 2020, de los llamados edificios de consumo de energía casi nulo, nZEB (Nery Zero Energy Buildings).

El 19 de junio de 2018, la Comisión Europea [97] acordó en el equipo del proyecto: “Una Unión de la Energía resiliente con una política de cambio climático que mire hacia el futuro”, revisar esta directiva nZEB para conseguir en líneas generales:

- Nuevo objetivo de eficiencia energética en 2030 del 32,5% revisable al alza en 2023.
- Impulsar mayores niveles de eficiencia más allá del año 2020.
- Derecho de los ciudadanos a generar y consumir energía limpia sin cargos hasta 2026.

Estos acuerdos tienen que ser traspuestos a la legislación de cada uno de los 28 estados en un plazo máximo de 18 meses. Estos acuerdos además tendrán gran impacto, dado que el consumo energético de los edificios representa el 40% del total de la energía consumida en la Unión Europea. Por este motivo,



paralelamente a los requisitos aplicables a los edificios nuevos, la Directiva dispone que los Estados miembros, apliquen políticas de apoyo que fomenten la adaptación del parque inmobiliario existente a unos niveles de consumo de energía casi nulo.

Con el fin de definir nZEB, la Comisión Europea publicó recomendaciones (UE) 2016/1318 de 29 de Julio de 2016 y varios países de la Unión Europea ya han traspuesto a sus legislaciones la definición de edificio nZEB. En España, el último borrador de modificación del CTE<sup>23</sup> contemplaba unos límites de consumo de energía primaria, a partir de los cuales, el edificio es considerado de consumo de energía casi nulo, distinguiendo entre edificio de uso residencial privado y el resto. Para residencial privado en zona geográfica “C” la perteneciente a La Coruña corresponde a un valor límite **CEP,nren lim** de **32 kWh/m<sup>2</sup> año**, como puede verse en esta tabla extraída del último proyecto de Ley y que finalmente se ha convertido en legislación mediante la última modificación del CTE de fecha 20 de diciembre de 2019, como se muestra en la Figura 84.

**Tabla 3.1.a - HE0**  
**Valor límite  $C_{ep,nren,lim}$  [kW·h/m<sup>2</sup>·año] para uso residencial privado**

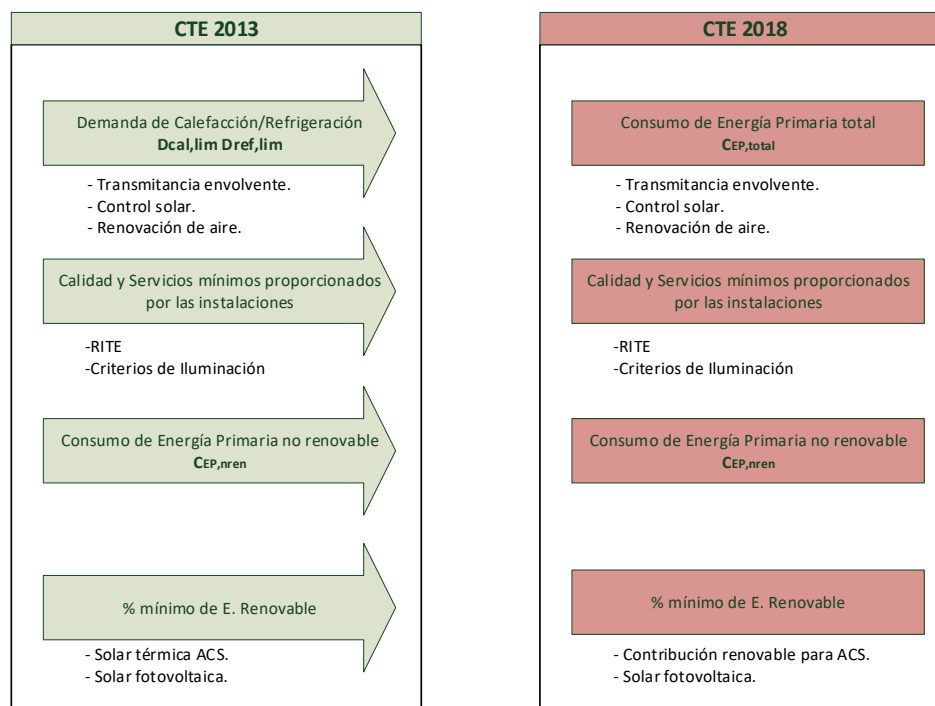
	Zona climática de invierno					
	$\alpha$	A	B	C	D	E
<b>Edificios nuevos y ampliaciones</b>	20	25	28	32	38	43
<b>Cambios de uso a residencial privado y reformas</b>	40	50	55	65	70	80

En territorio extrapeninsular (Illes Balears, Canarias, Ceuta y Melilla) se multiplicarán los valores de la tabla por 1,25

**Figura 84. Valor límite de Energía Primaria no renovable a partir de la cual es considerado el edificio nZEB.**

Las principales diferencias entre la legislación actual y la que se pretende publicar para conseguir alcanzar los edificios nZEB en 2020, son las mostradas en la Figura 85. *Criterios de modificación del CTE en el año 2018. Fuente: Ministerio de Fomento.*

<sup>23</sup> Proyecto de Real Decreto por el que se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. Fuente: <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentos-complementarios/357-proyecto-modificacion-cte-julio-2018.html>



**Figura 85. Criterios de modificación del CTE en el año 2018. Fuente: Ministerio de Fomento.**

Para observar el impacto de estas políticas vamos a realizar un estudio real del impacto de dichas actuaciones a varias tipologías de edificios ya existentes:

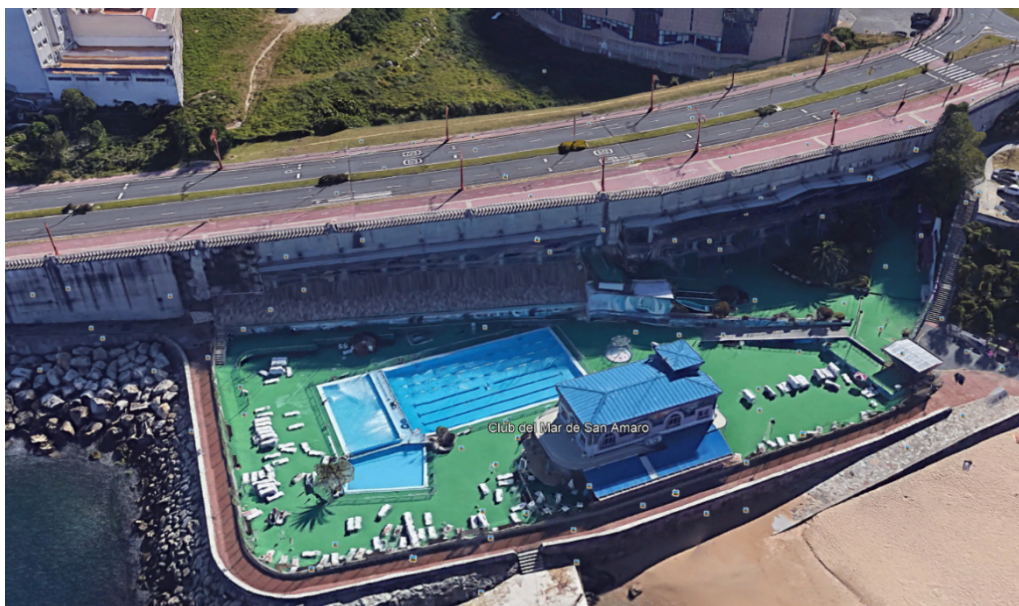
- 1) Edificio público de **uso deportivo y dotacional**.
- 2) Edificio privado de uso **residencial**.

La idea es estudiar su demanda y consumo actual, evaluando las posibilidades de reducción de la demanda, así como aporte de autoconsumo con energías renovables, viendo si mediante el uso de nuevas tecnologías y apoyo de generación de energía renovable son asumibles, así como estimando el impacto real en la sostenibilidad que ello puede tener, todo ello optimizando la inversión necesaria.

#### 5.1.2.1 EDIFICIO PÚBLICO DE USO DEPORTIVO Y DOTACIONAL.

Se trata de un edificio dedicado a club deportivo con un alto consumo térmico dedicado a la producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS) y climatización del ambiente delo local y sus piscinas.

El consumo anual de combustible fósil se centra en gas natural, consumido por calderas de tipo estándar atmosféricas.



**Figura 86. Vista general de complejo deportivo y dotacional objeto de estudio.**

La sala de calderas se encuentra al lado de los vestuarios masculinos exteriores, debajo de la terraza.



**Figura 87. Vista actual de equipos de generación térmica Remeha P-320 de 2x150 kW en edificio de uso deportivo y dotacional.**

Los equipos son dos calderas Remeha P-320 con quemadores CUENOD NC21 de potencia 150 kW.

La instalación dispone de una acumulación de ACS preparada mediante intercambiadores de placas de 2.500 litros.



**Figura 88. Acumulador de ACS de 2500 litros.**

De la demanda energética del edificio dedicado a gimnasio y piscina, aplicando la ISO 13.790 y el Código Técnico de la Edificación, para un local con 900 plazas de gimnasio/día, con un consumo 21 litros/día de ACS a 60°C asciende a un total de **18.900 litros** de ACS a 60°C.

Lo que requiere una energía térmica útil que se obtiene de la siguiente expresión ( 12 )

$$E = m \cdot Ce \cdot \Delta t \quad ( 12 )$$

Aplicando esta marcha de cálculo a todo el año se obtiene:

Mes	Nº Días	Tª A.F.S. (°C) (IDAE)	DEmes (kW h/mes)
Enero	31	8	35.341,49
Febrero	28	9	31.307,47
Marzo	31	11	33.302,56
Abril	30	13	30.912,84
Mayo	31	14	31.263,62
Junio	30	15	29.597,40
Julio	31	16	29.904,34
Agosto	31	15	30.583,98
Septiembre	30	14	30.255,12
Octubre	31	13	31.943,27
Noviembre	30	11	32.228,28
Diciembre	31	8	35.341,49
<b>ANUAL</b>	<b>365</b>	<b>12</b>	<b>381.981,85</b>

$$E = 1.381,21 \text{ kWh/día} \times 365 \text{ días} = \mathbf{381.981,85 \text{ kWh/año.}}$$

Además, dispone del consumo de la climatización de la piscina interior con lámina de agua de 300 m<sup>2</sup>, a 28 °C lo que implica un consumo energético indicado en la tabla:

Mes	Días mes	Text °C	Tint med °C	Pérdidas			
				Evaporación	Convección	Radiación	TOTAL DE
				Q <sub>ev</sub> kW h/mes	Q <sub>c</sub> kW h/mes	Q <sub>r</sub> kW h/mes	mes kW h/mes
Enero	31	12	22,50	18.597,58	6.731,71	834,84	26.164,13
Febrero	28	12	22,50	16.797,82	6.080,26	754,05	23.632,12
Marzo	31	14	23,50	18.597,58	5.696,06	709,93	25.003,58
Abril	30	14	23,50	17.997,66	5.512,32	687,03	24.197,01
Mayo	31	16	24,50	18.597,58	4.660,42	583,75	23.841,75
Junio	30	19	26,00	17.997,66	3.006,72	379,43	21.383,81
Julio	31	20	26,50	18.597,58	2.589,12	327,55	21.514,25
Agosto	31	21	27,00	18.597,58	2.071,30	262,69	20.931,57
Septiembre	30	20	26,50	17.997,66	2.505,60	316,98	20.820,24
Octubre	31	17	25,00	18.597,58	4.142,59	520,18	23.260,36
Noviembre	30	14	23,50	17.997,66	5.512,32	687,03	24.197,01
Diciembre	31	12	22,50	18.597,58	6.731,71	834,84	26.164,13
<b>ANUAL</b>	<b>365</b>	<b>15,9</b>	<b>24,45</b>	<b>218.971,53</b>	<b>55.240,13</b>	<b>6.898,30</b>	<b>281.109,96</b>

Consumo TERMICO TOTAL: 381.981,85+281.109,96 = **663.091,81 kWh/año**.

Con objeto de calcular la Energía Primaria consumida por las calderas actuales, se ha escogido la norma UNE EN 15378:2007 que deduce el Rendimiento Estacional Anual<sup>24</sup> de dichos equipos y para los generadores instalados es:

<sup>24</sup> R.E.A. : Rendimiento Estacional Anual.

**Tabla B.3 – Rendimiento estacional por defecto basado en el combustible, la antigüedad y el tipo de caldera (para utilizar en el apartado 5.9)**

Combustible, antigüedad y tipo de caldera	Rendimiento estacional por defecto
Gas, anterior a 1979, tiro natural o equilibrado, de pie	55%
Gas, de 1979 a 1997, tiro natural o equilibrado, de pie	65%
Gas, anterior a 1998, tiro natural o equilibrado, mural	65%
Gas, anterior a 1998, tiro forzado con ventilador, capacidad térmica alta	68%
Gas, anterior a 1998, tiro forzado con ventilador, capacidad térmica baja	72%
Gas, anterior a 1998, condensación	85%
Gas, de 1998 en adelante, sin condensación, con piloto permanente	69%
Gas, de 1998 en adelante, sin condensación, con encendido automático	73%
Gas de 1998 en adelante, condensación, con piloto permanente	79%
Gas de 1998 en adelante, condensación, con encendido automático	83%
Gasóleo, anterior a 1985	65%
Gasóleo, de 1985 a 1997	70%

**Figura 89. Tabla B3. de la norma UNE 15.378:2007 que estima el R.E.A. de un generador en función del combustible y año de fabricación.**

Tomando este R.E.A. del 73 %, nos da lugar a un consumo de ENERGIA PRIMARIA: **908.344,94 kWh/año.**

Además de este consumo, la iluminación del local es incandescente en su mayoría, por lo que el consumo actual es de 10 W/m<sup>2</sup> durante 16/h diarias:

10 W/m<sup>2</sup> x 6.307 m<sup>2</sup> x 16 h x 365 días = **368.328 kWh/año.**

Consumo anual TOTAL de energía: 908,34 + 368,33 MWh/año = **1.276,67 MWh/año.**

La demanda total del edificio por unidad de superficie queda en:

1.031.420 / 6.307 m<sup>2</sup> = **202,42 kWh/m<sup>2</sup> año.**

Comparamos estos datos ESTIMADOS con los consumos REALES anuales obtenidos de la facturación de un año, tal y como aparecen reflejados en la Tabla 31 Relación de facturas de electricidad y gas del complejo.

**Tabla 31 Relación de facturas de electricidad y gas del complejo.**

**RELACIÓN DE FACTURAS DE ELECTRICIDAD AÑO 2017**

Número factura	Período de facturación		Energía	Energía
	Fecha inicial	Fecha final	[kWh]	[tep]

PZZ701N002XXXX	01/01/2017	31/01/2017	75.046	6,45834768
PZZ701N003XXXX	01/02/2017	28/02/2017	70.260	6,0464716
PZZ701N004XXXX	01/03/2017	31/03/2017	70.549	6,07134251
PZZ701N006XXXX	01/04/2017	30/04/2017	60.677	5,22177281
PZZ701N007XXXX	01/05/2017	31/05/2017	75.258	6,47659208
PZZ701N009XXXX	01/06/2017	30/06/2017	77.855	6,70008606
PZZ701N010XXXX	01/07/2017	31/07/2017	80.250	6,90619621
PZZ01N012XXXX	01/08/2017	31/08/2017	59.491	5,1197074
PZZ701N013XXXX	01/09/2017	30/09/2017	73.145	6,29475043
PZZ01N015XXXX	01/10/2017	31/10/2017	77.399	6,66084337
PZZ01N016XXXX	01/11/2017	30/11/2017	75.500	6,49741824
PZZ801N000XXXX	01/12/2017	31/12/2017	77.309	6,65309811
TOTAL			<b>872.739</b>	75,1066265

Número factura	Período de facturación		Energía (2) (MWh)	Energía
	Fecha inicial	Fecha final	[MWh]	[tep]
2017FA0000XXXX	19/12/2016	16/01/2017	38,25	3,29173838
2017FA0001XXXX	16/01/2017	14/02/2017	45,08	3,87951807
2017FA0001XXXX	14/02/2017	15/03/2017	39,37	3,87951807
2017FA0002XXXX	15/03/2017	12/04/2017	10,34	0,88984509
2017FA0003XXXX	12/04/2017	15/05/2017	18,76	1,61445783
2017FA0003XXXX	15/05/2017	14/06/2017	31,37	2,69965577
2017FA0004XXXX	14/06/2017	11/07/2017	27,46	2,36316695
2017FA0004XXXX	11/07/2017	11/08/2017	37,68	3,24268503
2017FA0005XXXX	11/08/2017	07/09/2017	30,42	2,61790017
2017FA0006XXXX	07/09/2017	06/10/2017	24,68	2,12392427
2017FA0006XXXX	06/10/2017	13/11/2017	48,46	4,17039587
2017FA0007XXXX	13/11/2017	11/12/2017	41,99	3,61359725
			<b>393,86</b>	34,3864028

Número factura	Período de facturación		Energía (2)	Energía
	Fecha inicial	Fecha final	[MWh]	[tep]
2017FA0000XXXX	19/12/2017	16/01/2017	95,09	8,18330465
2017FA0000XXXX	16/01/2017	14/02/2017	109,39	9,41394148
2017FA0001XXXX	14/02/2017	15/03/2017	92,8	7,98623064

2017FA0002XXXX	15/03/2017	12/04/2017	87,83	7,55851979
2017FA0003XXXX	12/04/2017	15/05/2017	86,69	7,46041308
2017FA0003XXXX	15/05/2017	14/06/2017	53,69	4,62048193
2017FA0004XXXX	14/06/2017	11/07/2017	36,91	3,17641997
2017FA0005XXXX	11/07/2017	11/08/2017	32,53	2,79948365
2017FA0005XXXX	11/08/2017	07/09/2017	29,41	2,53098107
2017FA0006XXXX	07/09/2017	06/10/2017	75,47	6,49483649
2017FA0007XXXX	06/10/2017	13/11/2017	93,41	8,03872633
2017FA0007XXXX	13/11/2017	11/12/2017	96,79	8,32960413
TOTAL			<b>890,01</b>	76,5929432

Por lo tanto, se concluye que, el consumo REAL contabilizando el consumo de energía térmica y eléctrica es de:

Consumo anual REAL:  $890,01 + 393,86 + 872,73 \text{ MWh/año} = 2.156,60 \text{ MWh/año}$ .

La demanda REAL del edificio por unidad de superficie queda en:

$2.156.600 / 6.307 \text{ m}^2 = \mathbf{341,93 \text{ kWh/m}^2 \text{ año}}$ .



#### 5.1.2.1.1 POSIBILIDADES DE ACTUACIÓN EN EFICIENCIA EN ESTE EDIFICIO

Se parte de un consumo anual de energía de 2.156,60 MWh/año, y entre las posibles actuaciones para la reducción de la demanda (mejorar el aislamiento de tuberías, incorporar difusores en duchas, etc.) se observa que prácticamente todas ya han sido ejecutadas, por lo que la reducción de la demanda es muy poco probable, salvo la sustitución de la iluminación a tecnología LED, el resto de las actuaciones irán encaminadas hacia mejorar la tecnología e incorporar energías renovables [98] [99].

A continuación, detallamos las diferentes propuestas planteadas.

**PROPUESTA1:** Sustitución de iluminación a tecnología LED.

Esta actuación consigue una reducción directa de la demanda de energía eléctrica, pasando del actual consumo de 10 W/m<sup>2</sup> durante 16/h diarias, a no más de 4 W/m<sup>2</sup>:

$$4 \text{ W/m}^2 \times 6.307 \text{ m}^2 \times 16 \text{ h} \times 365 \text{ días} = \mathbf{147.331 \text{ kWh/año.}}$$

**PROPUESTA2:** Sustitución de actuales calderas por equipos de condensación.

Esta actuación consigue un aumento del Rendimiento Estacional Anual de los equipos actuales (0,73) a valores superiores al 100% medido a PCI.

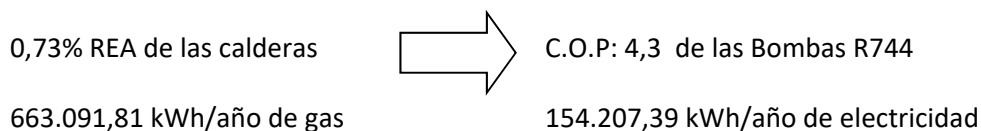
**PROPUESTA3:** Incorporación de **Bombas de Calor para ACS** con R744 e incorporación de **generación solar fotovoltaica**.

Para la actuación se propone la instalación de dos bombas de calor para servicio de producción de ACS a partir de bombas de calor para producción de agua caliente sanitaria desde 60°C a 90°C mediante bomba de calor con compresor de gas refrigerante R744 (CO<sub>2</sub>).

Este equipo consigue una alta eficiencia energética en todas las condiciones de funcionamiento gracias a la combinación, en un solo compresor, de la tecnología de compresión rotativa y scroll, así como a la utilización del refrigerante R744 (CO<sub>2</sub>). Este refrigerante permite trabajar en régimen supercrítico, este modo

de trabajo permite alcanzar altas temperaturas, pero por el contrario, requiere temperaturas de entrada muy bajas (inferiores a 30°C).

Con esta primera actuación, el consumo de energía primaria de gas natural se reduce a 154.207,39 kWh/año de electricidad. Lo que implica:



Por la producción de energía FV. El edificio permite la incorporación de 200 m<sup>2</sup> de paneles fotovoltaicos. Estos paneles permiten la instalación de unos 100 paneles solares de potencia pico 320 W, dando lugar a una generación:

Potencia Pico instalada: 32.000 Wp.

Se realiza un estudio de la producción solar de dicho campo tomando valores de radiación solar de PVGIS [100] .

Fixed system: inclination=35°, orientation=-12°				
Month	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Jan	53,50	1660	2,10	65,10
Feb	82,10	2300	3,23	90,50
Mar	114,00	3530	4,64	144,00
Apr	121,00	3630	4,98	149,00
May	128,00	3960	5,29	164,00
Jun	133,00	3990	5,56	167,00
Jul	136,00	4210	5,74	178,00
Aug	136,00	4200	5,72	177,00
Sep	126,00	3770	5,25	158,00
Oct	90,70	2810	3,72	115,00
Nov	61,60	1850	2,44	73,30
Dec	54,60	1690	2,16	66,80
<b>Yearly average</b>	<b>103,00</b>	<b>3130</b>	<b>4,24</b>	<b>129,00</b>
<b>Total for year</b>	<b>37.600</b>		<b>1550</b>	

Dado que el consumo eléctrico es muy superior al producido por el campo solar, no se dispone de momentos de excedente de producción, aprovechando el 100% de la generación en autoconsumo.

En resumen, las actuaciones propuestas consiguen:

	<b>Demanda Teórica</b> [kWh/año]	<b>E. Primaria ACTUAL</b> [kWh /año]	<b>E. Primaria FUTURA</b> [kWh/año]
3- ACS	381.981,85	523.262,81	154.207,39
2- CLIMA PISCINAS	281.109,96	385.082,14	
1- ILUMINACIÓN	368.328,00	368.328,00	147.331,00
E. RENOVABLE	----	----	- 37.600,00
<b>Consumo TOTAL ANUAL</b>		<b>1.276.672,95</b>	<b>263.938,39</b>
		<b>202,42 kWh/m<sup>2</sup> año</b>	<b>41,85 kWh/m<sup>2</sup> año</b>

De este modo el consumo energético de energía primaria cumpliría el nuevo estándar de nZEB que limita en 65 kWh/m<sup>2</sup> el edificio en esta zona.

**41,85 kWh/m<sup>2</sup> año < 65 kWh/m<sup>2</sup> → Edificio nZEB.**

La actuación de energía renovable, si no se implementa, nos daría un consumo de:

**47,89 kWh/m<sup>2</sup> año < 65 kWh/m<sup>2</sup> → Edificio nZEB.**

Sin embargo, cada una de estas actuaciones tiene un importe de ejecución material que en la mayoría de los casos suele ser determinante en la selección de cuál ejecutar.

Tras el estudio técnico de cada solución, la medición de cada obra nos da la inversión necesaria para cada intervención, siendo el importe de cada solución el detallado a continuación:

	<b>IMPORTE</b>
3-ACS	92.600 €

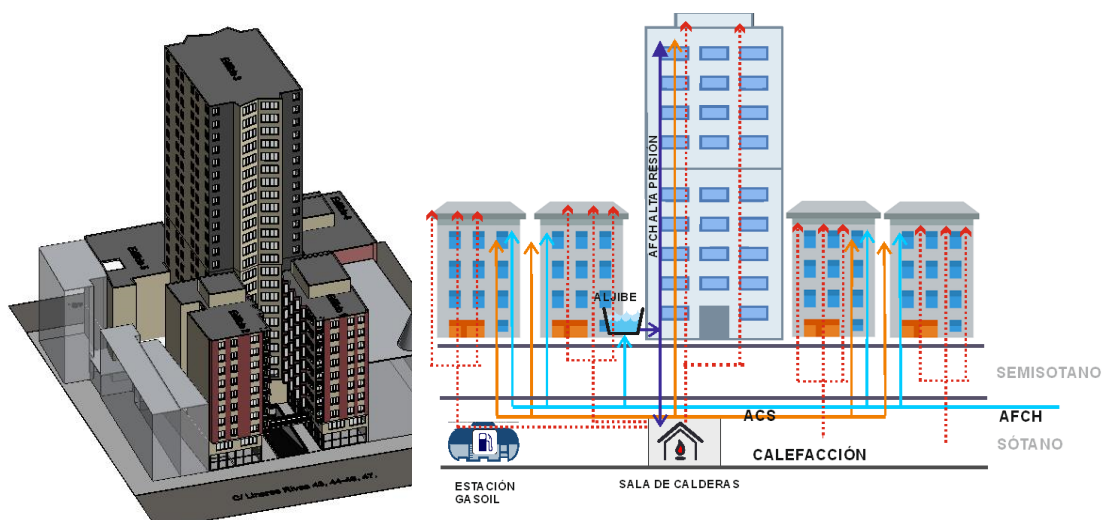
2-CLIMATIZACIÓN DE PISCINAS	
1-TRANSFORMACIÓN DE LA ILUMINACIÓN A LED	67.850 €
INCORPORACIÓN DE E. RENOVABLE	38.400 €
	<b>198.850 €</b>

Para realizar esta obra se requiere una inversión por unidad de superficie queda en:

$$198.850 / 6.307 \text{ m}^2 = \mathbf{31,53 \text{ €/m}^2}.$$

#### 5.1.2.2 EDIFICIO PRIVADO DE USO RESIDENCIAL.

Si se realiza de nuevo el estudio de posibles acciones de mejora y adecuación a nZEB, sobre un edificio residencial formado por un conjunto de 198 viviendas repartidas en 5 portales, obtendremos lo siguiente:



El consumo energético total de edificio se concentra en:

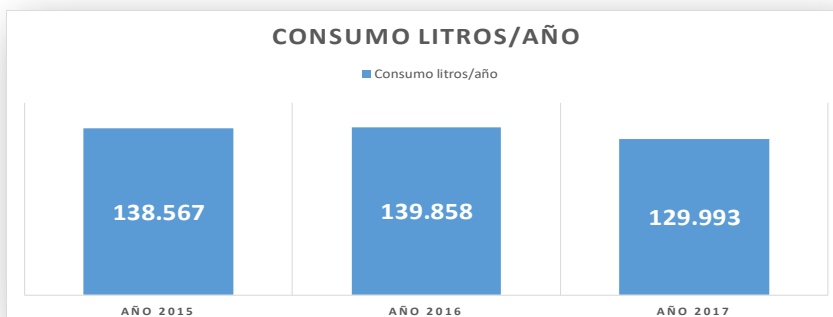
- Consumo de calefacción.
- Consumo de ACS.
- Iluminación de zonas comunes.

Evaluando su actual demanda energética del edificio, teniendo en cuenta sus cerramientos, carpintería, iluminación y superficies de zonas comunes, se obtiene una demanda energética global de energía primaria de:

Demanda anual según ISO 13.790: **1.407.644,90 kWh/año**

Procediendo nuevamente de la misma manera procedemos a verificar esta demanda con los consumos reales de dicho edificio.

El consumo anual de combustible gasoil es el siguiente:



**Figura 90. Consumo en litros/año de combustible del edificio.**

Tomando de media un consumo de 135.000 litros, obtenemos la siguiente energía primaria consumida:

$$135.000 \text{ litros/año} \times \text{Poder Calorífico gasoil } 10,28 \text{ kWh/litro} = \mathbf{1.387.000 \text{ kWh/año}}$$

Igualmente, de las facturas de electricidad destinada a servicios comunes obtenemos un consumo anual de:

$$\text{Consumo anual de electricidad} = \mathbf{237.000 \text{ kWh/año}}$$

El consumo anual REAL del edificio asciende a: 1.624.000 kWh/año que corresponde a un consumo real de: 68,90 kWh/m<sup>2</sup> año, ya que se dispone de una superficie útil de 23.914,75 m<sup>2</sup>.

#### 5.1.2.2.1 POSIBILIDADES DE ACTUACIÓN EN EFICIENCIA

Se parte de un consumo anual de energía de 1.624 MWh/año, y entre las posibles actuaciones para la reducción de la demanda encontramos; actuar en la envolvente, la sustitución de la iluminación a tecnología LED,... el resto de las actuaciones irán encaminadas hacia mejorar la tecnología e incorporar energías renovables.

# PROPUESTA1: Mejora de la envolvente del edificio.

Consiste en la incorporación de aislamiento inyectado en la actual cámara de aire, pasando de una transmitancia de la envolvente actual de  $U = 0,96 \text{ W/m}^2\text{K}$ . resultado del cálculo mostrado en la *Figura 91*. Transmitancia actual del muro exterior del , a una nueva transmitancia de  $U = 0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$ , mostrada en la *Figura 92*. Transmitancia futura del muro exterior del

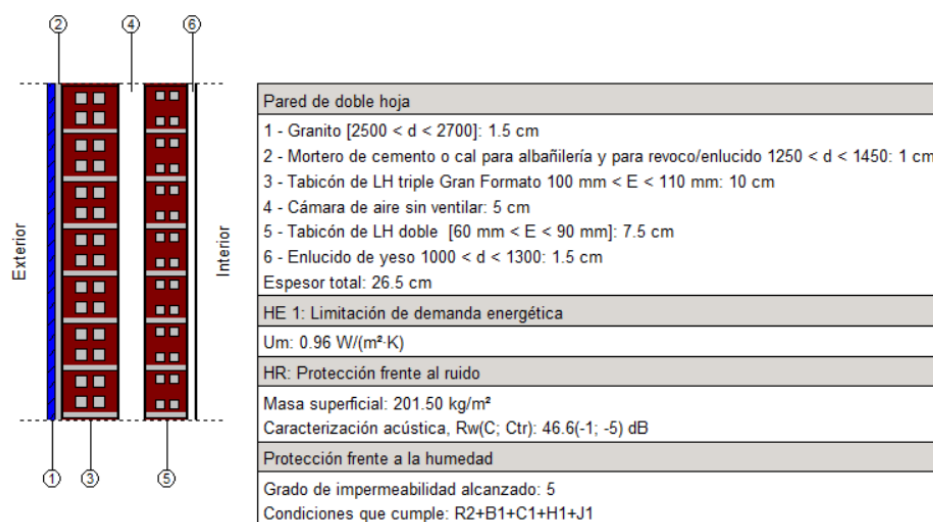


Figura 91. Transmitancia actual del muro exterior del edificio.

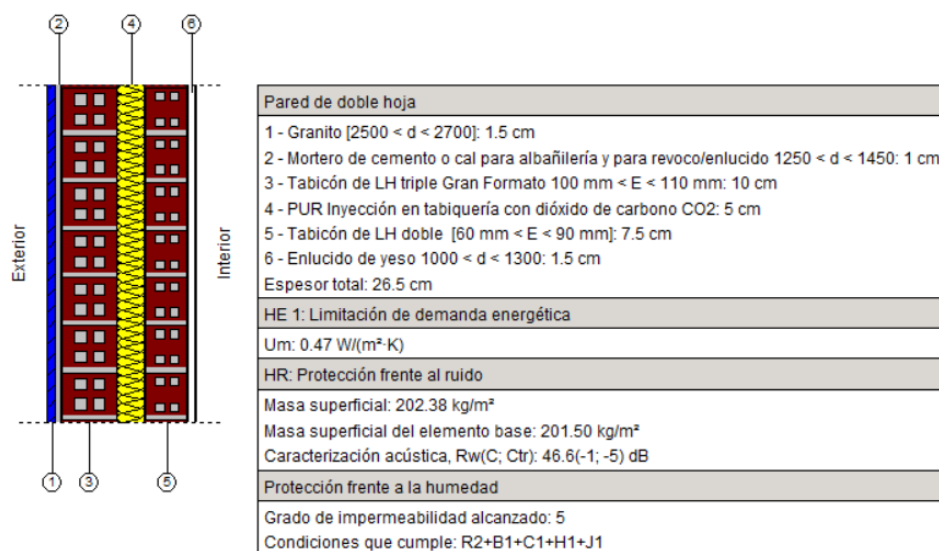


Figura 92. Transmitancia futura del muro exterior del edificio.

El resultado de esta actuación es una reducción de la demanda de calefacción de: 1.604.251,09 kWh/año a 1.269.246,18 kWh/año consiguiendo una reducción de 335.004 kWh/año.

**PROPUESTA2:** Sustitución de actuales calderas por equipos de condensación y transformación a LED.

Esta actuación consigue un aumento del Rendimiento Estacional Anual de los equipos actuales de combustible gasoil (65%) a valores superiores al 100% medidos a PCI, cambiando a combustible gas y tecnología de condensación. En consecuencia, la presente actuación, implica una reducción de energía primaria mínima del 35%.

Ahorro por cambio de tecnología: 485.450,00 kWh/año

**PROPUESTA3:** Transformación de la iluminación a tecnología LED.

En la parte de iluminación, considerando los equipos de iluminación con la actual tecnología, se consigue un ahorro mínimo de: 143.468 kWh/año.

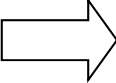
CONSUMO ACTUAL:	$23.914,75 \times 10 \text{ W/m}^2 =$	239.127 kWh/m <sup>2</sup>
CONSUMO FUTURO LED:	$23.914,75 \times 4 \text{ W/m}^2 =$	95.659 kWh/m <sup>2</sup>

Ahorro: 143.468 kWh/año.

**PROPUESTA4:** Incorporación de **Bombas de Calor para ACS** con R744.

Para este caso se dispone de un consumo energético útil destinado a ACS de: 231.172 kWh/año.

Utilizando una Bomba de calor para producción de ACS el ahorro en energía primaria, y comparándola con la energía primaria que consumo la actual caldera de gasoil, la diferencia sería de:

0,65% REA de las calderas		C.O.P: 4.3 de las Bombas R744
355.649,23 kWh/año de gasoil		53.760,93 kWh/año de electricidad

Ahorro de: **301.888 kWh/año**

**PROPUESTA5:** Incorporación de **generación solar fotovoltaica**.

La cubierta disponible para producción fotovoltaica permite la instalación de 160 paneles solares de 320Wp, obteniéndose una producción solar de 67.800 kWh de electricidad al año.

<b>Fixed system: inclination=35°, orientation=0°</b>				
<b>Month</b>	<b><math>E_d</math></b>	<b><math>E_m</math></b>	<b><math>H_d</math></b>	<b><math>H_m</math></b>
Jan	103,00	3190	2,51	78,00
Feb	155,00	4350	3,81	107,00
Mar	206,00	6370	5,22	162,00
Apr	215,00	6450	5,52	166,00
May	222,00	6880	5,73	178,00
Jun	231,00	6920	6,02	181,00
Jul	236,00	7330	6,24	193,00
Aug	238,00	7370	6,26	194,00
Sep	226,00	6790	5,90	177,00
Oct	170,00	5270	4,35	135,00
Nov	118,00	3540	2,91	87,30
Dec	107,00	3320	2,62	81,30
<b>Yearly average</b>	<b>186,00</b>	<b>5650</b>	<b>4,76</b>	<b>145,00</b>
<b>Total for year</b>	<b>67.800</b>		<b>1740</b>	

En resumen las actuaciones propuestas consiguen las variaciones en la demanda de energía primaria no renovable recogidas en la Tabla 32.



**Tabla 32. Variación de la demanda de energía de las posibles actuaciones en eficiencia**

	Consumo REAL [kWh/año]	E. Primaria REAL ACTUAL [kWh/año]	E. Primaria FUTURA [kWh/año]
1 MEJORA ENVOLVENTE	1.604.251,09	1.604.251,09	1.269.246,18
2 CAMBIO DE CALDERAS		1.387.000,00	901.550,00
3 ACS CON BOMBA		355.649,23	53.760,93
4 ILUMINACIÓN		239.127,00	95.659,00
5 E. RENOVABLE		----	67.800,00
		<b>68,90 kWh/m<sup>2</sup> año</b>	<b>28,24 kWh/m<sup>2</sup> año</b>

De este modo el consumo energético de energía primaria cumpliría el nuevo estándar de nZEB que limita en 65 [kWh/m<sup>2</sup> año]. De dicho resultado, se puede concluir que se podría conseguir fácilmente realizando **una sola de las actuaciones**. En la Tabla 33 se presenta el resultado alcanzado con cada actuación de forma individual y que confirma que una sola de ellas es capaz de convertir el edificio a un edificio dentro del estándar nZEB.

**Tabla 33 Consumo energético anual en [kWh/ m<sup>2</sup> año], producido por cada actuación**

	Consumo REAL [kWh/año]	E. Primaria TRAS CADA ACTUACIÓN [kWh/año]	Consumo nZEB. [ kWh/m <sup>2</sup> año]
1 MEJORA ENVOLVENTE	1.604.251,09	1.269.246,18	<b>53,07 &lt; 65</b>
2 CAMBIO DE CALDERAS		1.118.801,09	<b>46,78 &lt; 65</b>
3 ACS CON BOMBA		1.302.362,79	<b>54,46 &lt; 65</b>
4 ILUMINACIÓN		1.460.783,09	<b>61,08 &lt; 65</b>
5 E. RENOVABLE		1.536.451,09	<b>64,25 &lt; 65</b>

Para finalizar, cabe destacar que las actuaciones nos transforman el edificio actual en un edificio con criterios normalizados nZEB, incluso la actuación más simple que sería la incorporación de un campo solar fotovoltaico.

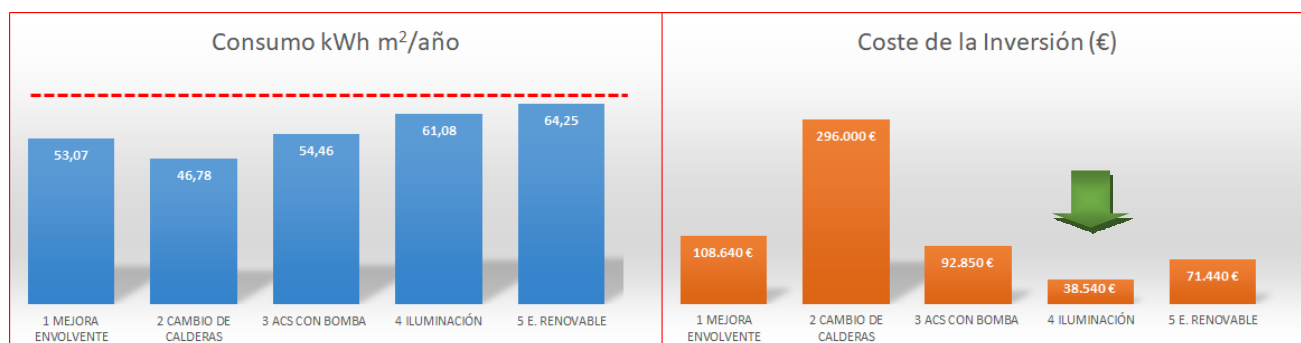
**5 E.RENOVABLE: 64,25 < 65 kWh/m<sup>2</sup> → Edificio nZEB.**

Sin embargo, a la hora de decidir qué actuación realizar, el criterio principal se basa en la búsqueda del equilibrio entre COSTE y RENTABILIDAD. Para valorar dichas propuestas partimos del presupuesto de ejecución material de cada una de las posibles actuaciones, resumiendo estas en la siguiente tabla:

**Tabla 34. Valoración económica de cada acción potencial de mejora.**

	IMPORTE
1 MEJORA ENVOLVENTE	108.640 €
2 CAMBIO DE CALDERAS	296.000 €
3 ACS CON BOMBA	92.850 €
4 ILUMINACIÓN	38.540 €
5 E. RENOVALE	71.440 €
	<b>577.470 €</b>

A la vista de estos datos, la solución de mínima inversión es la **número 4 ILUMINACION**, que implicaría una reducción de consumo por metro cuadrado de 68,90 a 61,08 [kWh/m<sup>2</sup>año].



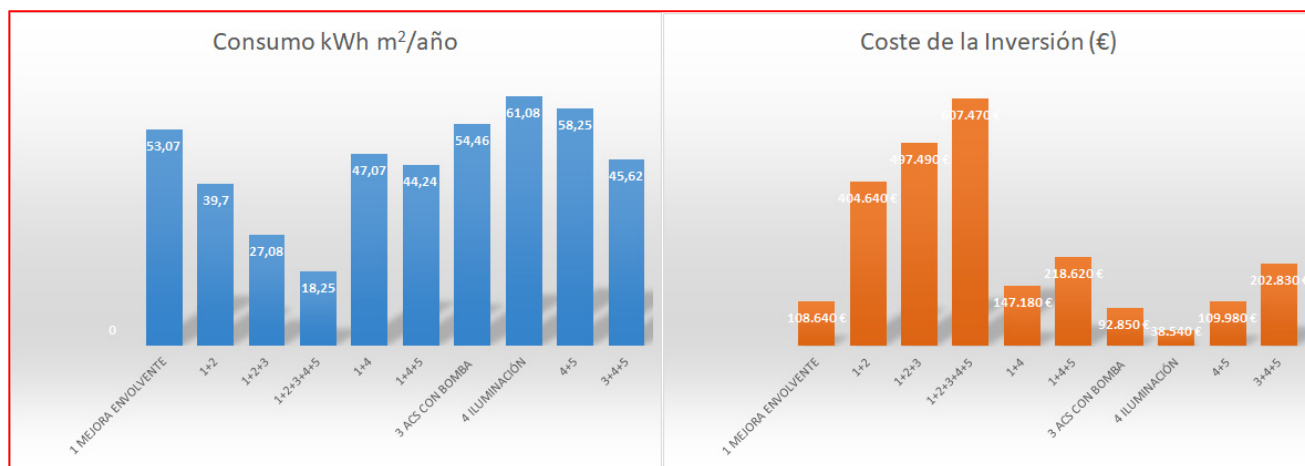
**Figura 93. Solución de mínimo coste de inversión.**

Se observa que, si la valoración se realizase por mínimo impacto energético, sin conocer el coste de la actuación, la actuación que “supuestamente” implicaría un menor coste sería la actuación 5, ya que tan solo reduce el consumo a 64,25 [kWh/m<sup>2</sup>año]. Sin embargo, si se realiza la actuación más barata (sustitución de la iluminación led), observamos que el impacto energético es **mucho mayor** que si invertimos en energía renovable.

A continuación, se procede al análisis de combinaciones de las actuaciones anteriores, y se observa que los resultados no son lineales, es decir que la suma de múltiples actuaciones no tiene el impacto energético de la suma de las mismas.

**Tabla 35. Consumo energético anual en [kWh/ m<sup>2</sup> año], producido por cada actuación y sus posibles combinaciones**

ACTUACIONES	IMPORTE DE EJECUCIÓN [€]	CONSUMO OBTENIDO [kWh/m <sup>2</sup> año]
1 MEJORA ENVOLVENTE	108.640 €	53,07
1+2+3+4+5	607.470 €	18,25
1+2	404.640 €	39,70
1+2+3	497.490 €	27,08
1+4+5	218.620 €	44,24
3 ACS CON BOMBA	92.850 €	54,46
4 ILUMINACIÓN	38.540 €	61,08
4+5	109.980 €	58,25
1+4	147.180 €	47,07
3+4+5	202.830 €	45,62



**Figura 94. Representación gráfica del Consumo obtenido y el Coste de la inversión**

Si se ejecuta la totalidad de las medidas en este edificio<sup>25</sup>, se ha observado que conseguimos reducir el consumo a 18,25 [kWh/m² año], si bien se necesita realizar una inversión de más de **607.470 €**. El ahorro provocado tiene un coste de 0,52 €/kWh ahorrado.

Para finalizar, si representamos los resultados de cada combinación y ponderamos el ratio de inversión (€) por kWh/año ahorrado, el resultado es el mostrado en la Tabla 36.

**Tabla 36 Combinaciones de las diferentes propuestas de actuación ordenadas por ratio de inversión €/kWh ahorrado.**

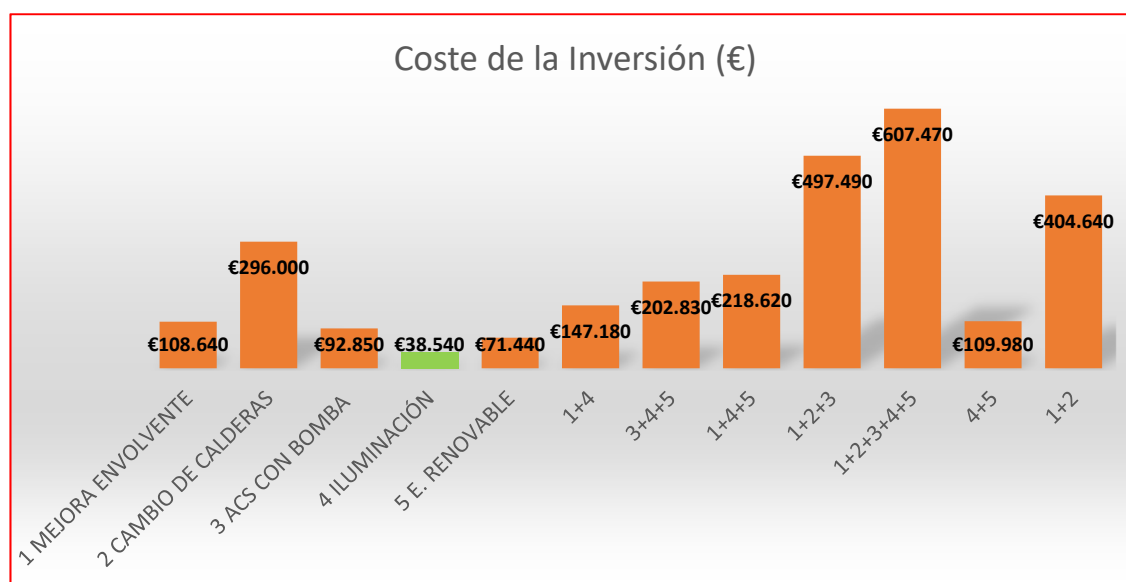
ACTUACIONES	IMPORTE [€]	CONSUMO OBTENIDO [kWh/m² año]	RATIO INVERSIÓN [€/kWh ahorrado]
1 MEJORA ENVOLVENTE	108.640 €	53,07	0,3243 €
1+2+3+4+5	607.470 €	18,25	0,5201 €
1+2	404.640 €	39,70	0,6180 €
1+2+3	497.490 €	27,08	0,5200 €
1+4+5	218.620 €	44,24	0,4002 €
3 ACS CON BOMBA	92.850 €	54,46	0,3076 €
4 ILUMINACIÓN	38.540 €	61,08	0,2686 €
4+5	109.980 €	58,25	0,5206 €
1+4	147.180 €	47,07	0,3654 €
3+4+5	202.830 €	45,62	0,3953 €

<sup>25</sup> NOTA: Cabe destacar que en ocasiones la suma de todas las medidas provoca incluso ahorros inferiores ya que el exceso de aislamiento provoca consumos por refrigeración que antes no teníamos.

Si bien con los datos obtenidos, aparentemente la inversión de menor ratio es la Nº 4 de iluminación que asciende a 0,2685 €/kWh ahorrado. El seleccionar esta actuación, tampoco garantiza que la inversión sea la óptima, ya que estamos maximizando el ahorro energético en kWh a menor coste de inversión.

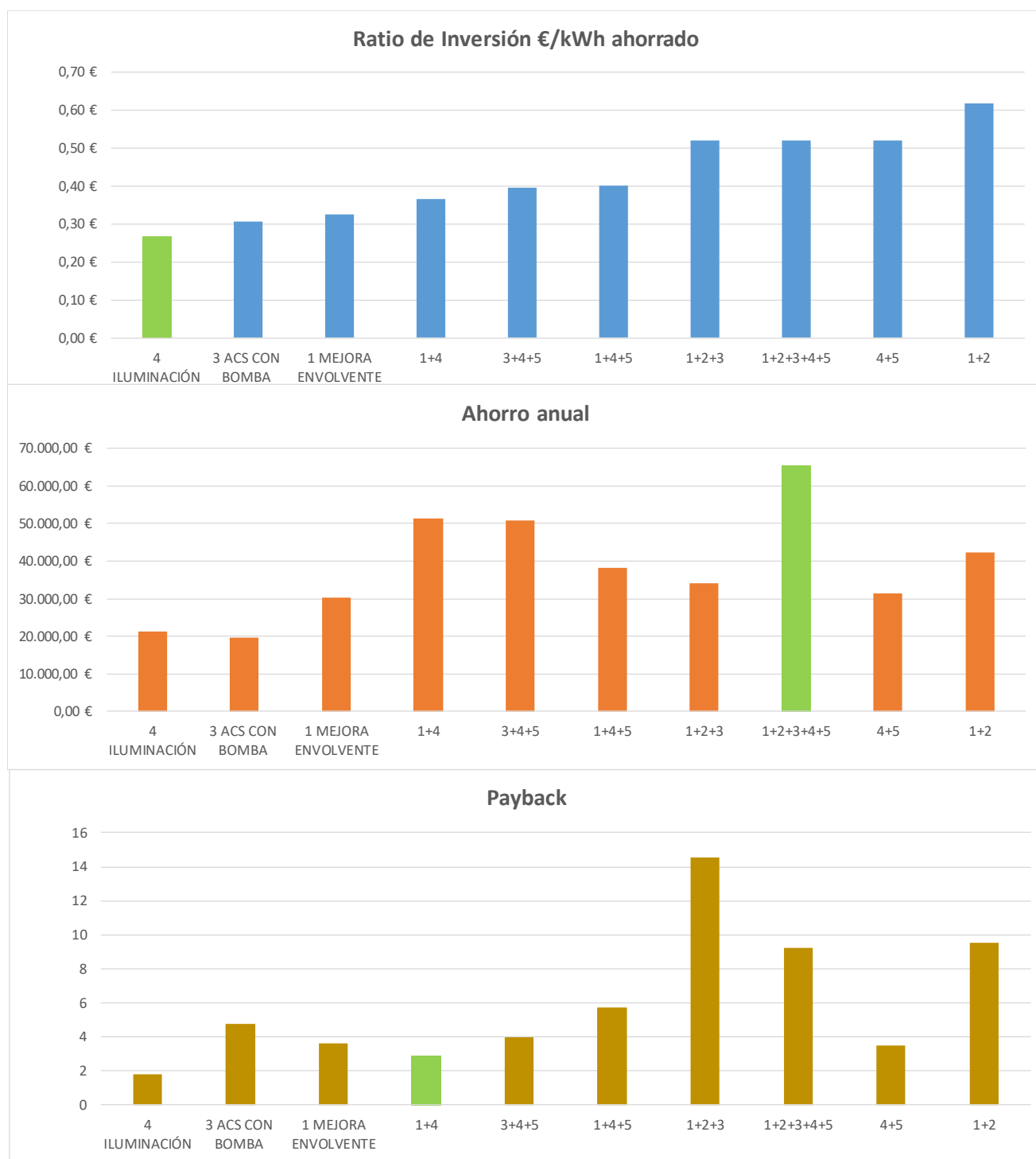
Económicamente la inversión realizada es óptima, ya que se consigue un ahorro máximo con la inversión realizada. Sin embargo, los costes cada kWh ahorrado, dependen directamente del tipo de combustible ahorrado, existiendo una diferencia considerable entre el precio del kWh de electricidad (0,15 €/kWh) y el precio del gasoil utilizado como combustible térmico (0,08 €/kWh).

Si se pondera la misma tabla considerando el payback de la inversión, se obtiene que los resultados son ligeramente diferentes y pueden visualizarse en la Figura 96.



**Figura 95. Distribuciones gráficas de los costes de cada inversión y sus combinaciones. Se destaca la de menor importe.**

Por otra parte, se observa que, si ordenamos las inversiones de menor a mayor ratio por metro cuadrado, la inversión en sustitución de la iluminación es la que menor inversión representa, si bien el impacto en el ahorro es inferior al establecido por otras medidas.



**Figura 96. Ratio de inversión, ahorro anual y payback de cada actuación y sus combinaciones.**

Con objeto de optimizar las inversiones es posible representar la inversión frente al impacto económico mediante el denominado Pay-Back o retorno de la inversión.

De este modo se observa que una medida con un Pay-Back muy bajo es la unión de las medidas 4 y 1. Esta actuación permite recuperar la inversión antes de 3 años.

## 5.2 APLICACIÓN DEL MODELO

Visto en el epígrafe anterior cómo la máxima inversión en eficiencia no garantiza ni el mayor ahorro energético, ni la mayor recuperación de la inversión, unido a las desviaciones observadas entre los modelos de certificación energética y los valores reales observados, se justifica la necesidad de buscar la modelización de los edificios para obtener la optimización energética y económica de todas las posibilidades de actuación.

### 5.2.1 RESULTADOS INICIALES Y SUS IMPLICACIONES ECONÓMICAS

Tal y como se ha descrito en el apartado 4.2.1, la metodología planteada parte de la modelización de un edificio al que se le ha aplicado el método de Montecarlo que finalmente nos ha entregado una tabla de datos en la que hemos incorporado los datos económicos de cada una de las actuaciones. Estas inversiones incorporadas a la tabla nos han sintetizado el modelo, con ayuda de superficies de respuesta dos ecuaciones.

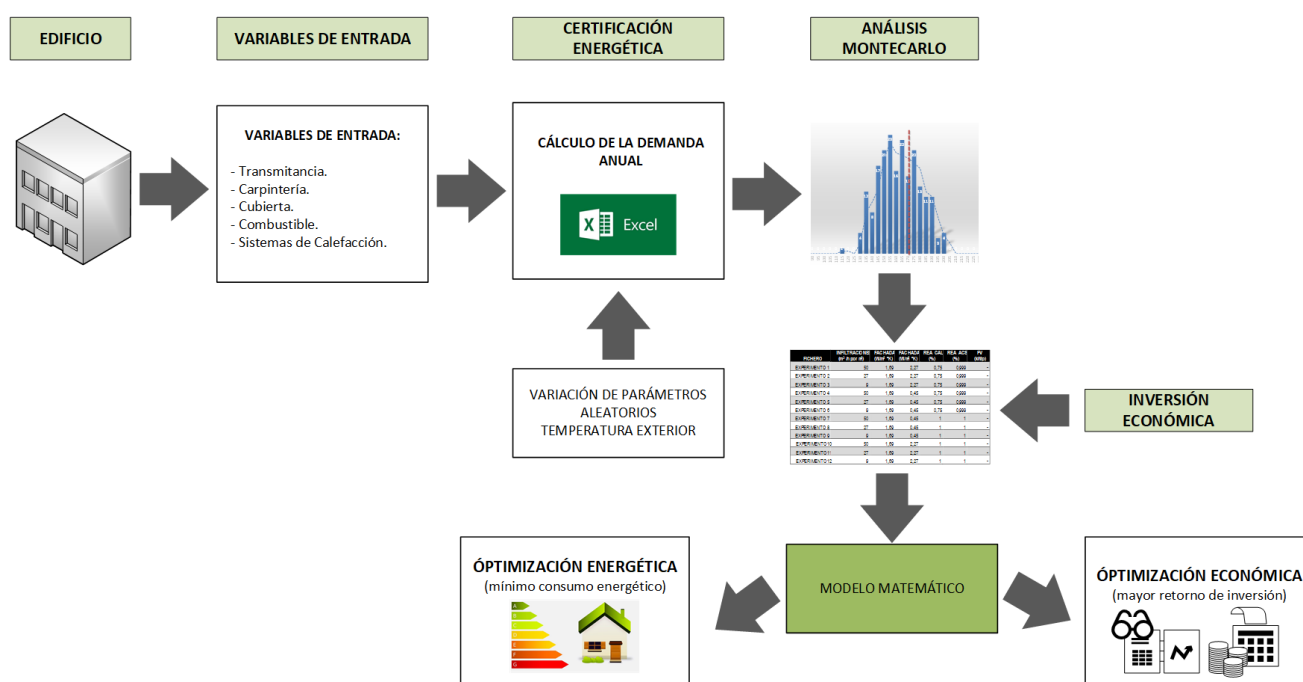


Figura 97. Descripción gráfica del modelo diseñado para la optimización energética y económica de los edificios.

Las dos ecuaciones ( 10 ) y ( 11 ) responden al modelo de edificio obtenido de los datos resumidos en la Tabla 28. De esta forma, la ecuación que modeliza el COSTE parte de un valor base de 254.641 € que se reduce más cuando las variables ACH, UF, UC experimentan sus valores más altos relacionados con las condiciones actuales y el menor coste de inversión.

Es interesante resaltar qué ocurre cuando no se cambia la caldera (0) debido a que, en este caso, la producción eléctrica fotovoltaica ejercerá un efecto inverso, aumentando el coste al tiempo que aumenta la producción fotovoltaica. Cuando se realiza un cambio de caldera, este efecto anterior de la producción fotovoltaica, se modifica por nuevos términos de esta ecuación ( 10 ).

Si ahora analizamos la segunda ecuación, ( 11 ) no se pueden obtener las mismas conclusiones tan fácilmente sobre el efecto de cada variable en el consumo de energía.

Con los modelos matemáticos definidos por las ecuaciones ( 10 ) y ( 11 ), ahora se puede obtener el consumo de energía y la inversión económica necesaria de cada posible actuación en eficiencia (columnas 4-8 de la Tabla 37 y Tabla 38 Tabla 37).

**Tabla 37. Posibilidades de actuación ordenadas por coste.**

FILA	COSTE	CONSUMO DE E.PRIMARIA	ACH	UF	UC	COMB_CALOR	FV
	(€ )	(W/m <sup>2</sup> K)	(W/m <sup>2</sup> K)	(kWh/m <sup>2</sup> año)	(kWh/m <sup>2</sup> año)		(Wp)
1	215.345	134,802	9	0,590	0,450	1	0.000
2	214.655	119,156	9	0,590	0,450	1	5.000
3	213.965	108,729	9	0,590	0,450	1	10.000
4	213.275	103,523	9	0,590	0,450	1	15.000
5	212.585	103,536	9	0,590	0,450	1	20.000
6	212.352	121,355	27	0,590	0,450	1	0.000
7	211.895	108,770	9	0,590	0,450	1	25.000
8	211.662	106,186	27	0,590	0,450	1	5.000
9	211.091	124,046	9	0,590	1,000	1	0.0000
10	210.972	96,236	27	0,590	0,450	1	10.000
11	210.401	108,400	9	0,590	1,000	1	5.000
12	210.282	91,507	27	0,590	0,450	1	15.000
13	209.834	201,237	27	0,590	0,450	0	25.000
14	209.711	97,973	9	0,590	1,000	1	10.000



15	209.592	91,997	27	0,590	0,450	1	20.000
25	207.286	98,031	50	0,590	0,450	1	15.000
26	206.838	222,688	50	0,590	0,450	0	25.000
27	206.717	84,589	27	0,590	1,000	1	10.000
28	206.596	99,131	50	0,590	0,450	1	20.000
29	206.027	79,860	27	0,590	1,000	1	15.000
42	201.268	99,209	9	0,590	2,270	1	0.000
50	198.274	82,813	27	0,590	2,270	1	0.000
51	197.834	182,646	27	0,590	0,450	0	15.000
52	197.818	73,176	9	0,590	2,270	1	25.000
53	197.584	67,644	27	0,590	2,270	1	5.000
54	196.894	57,694	27	0,590	2,270	1	10.000
55	196.204	52,965	27	0,590	2,270	1	15.000
56	195.514	53,455	27	0,590	2,270	1	20.000

Si todas estas posibilidades se ordenan de acuerdo con su inversión económica (número de fila), se obtiene la Tabla 37. En consecuencia, la Tabla 37 comienza en la fila 1 mostrando las actuaciones en eficiencia más costosas que se pueden llevar a cabo en el edificio, cada una de ellas con su consumo energético relacionado. En consecuencia, por un lado, se ha observado que la inversión con mayor coste económico no proporciona el menor consumo energético. En este sentido se correspondería con una selección de carpintería categoría 1 (la mejor), transmitancia de fachada 0,59 (la mejor), transmitancia de cubierta 0,45 (la mejor), cambio de combustible a gas natural y la no incorporación de energía eléctrica fotovoltaica. En consecuencia, la producción corresponde a una inversión de 215.345 € y reduce el consumo a 134,80 kWh/m<sup>2</sup> como podemos ver en la Tabla 37 en su fila 1.

En esta Tabla 37 se puede observar que el efecto de cambiar la actual caldera diésel (0) a caldera de gas natural (1) ejercerá un efecto mayor sobre el coste final con independencia del nivel de energía fotovoltaica generada. Este coste máximo se obtiene cambiando la caldera, la carpintería y mejorando la transmitancia de toda la envolvente, como podemos ver en las filas 1 a 5. Al mismo tiempo, la producción fotovoltaica ejerce en estas combinaciones iniciales una ligera disminución del coste de la inversión, a pesar de aumentar la potencia instalada.

De esta misma tabla, se puede observar que, solo cuando se combina la producción máxima de energía fotovoltaica disponible con un nivel de carpintería 2, sin cambiar la caldera de diésel, el coste será tan alto como la combinación consistente en cambiar a una caldera de gas natural, véase la fila 13. A pesar de este coste económico similar, se observa que los resultados obtenidos con las actuaciones basadas en el cambio a la producción fotovoltaica en lugar de una caldera implican un consumo de energía de 201 kWh/m<sup>2</sup> en esta fila 13, que es casi el doble del consumo de energía obtenido de la combinación de la fila 12 para casi la misma inversión económica.

Finalmente, buscando la optimización de la ecuación de consumo de energía, ( 11 ) se obtuvo que la mejor opción es carpintería categoría 2 (media), transmitancia de fachada 0,59 (la mejor), transmitancia de cubierta 2,27 (la actual) , cambio de la sala de calderas a gas natural como combustible y la incorporación de energía fotovoltaica de potencia 15 kWp. Esta inversión corresponde a 196.204 € y reduce el consumo anual del edificio a valores de 52,97 kWh/m<sup>2</sup>, como podemos ver en la Tabla 37 fila 55.

Para entender por qué una inversión en actuaciones más costosas no alcanzará el diseño óptimo del edificio, se deben dar algunas explicaciones. En este sentido, es interesante recordar que se trata de un proceso tan complejo y no lineal donde cada actuación desde la más barata a la más costosa, debe ser analizada en profundidad para poder alcanzar el óptimo. En este sentido, la fila 4 de la Tabla 37, muestra que apenas aumentando la producción de energía fotovoltaica se observa una reducción de la inversión y del consumo energético.

Finalmente, la fila 42 de la Tabla 37 muestra una alta disminución de la inversión económica y el consumo de energía debido a que, en este caso, se considera un edificio sin cambiar la transmitancia de la cubierta. La combinación simultánea de todas estas modificaciones permitirá alcanzar la modernización óptima al menor coste, fila 55.

De este resultado se puede concluir que, para la condición climática particular de la región donde se ubica el edificio, el efecto de la fachada es más importante que el efecto de la transmitancia de la cubierta. Además, esta modificación combinada con un cambio de caldera son los principales parámetros hacia una reducción del consumo energético.

Otra conclusión derivada es que, en este caso de estudio, un incremento de las infiltraciones, dentro de valores razonables, ejercerá una disminución del consumo energético y de la inversión económica. Este mismo efecto ocurre con los paneles solares, pero, como se observará en la Figura 98 el efecto de la FV no es una variable lineal y, para alcanzar el punto óptimo, se debe emplear un valor intermedio de 15.000 kWp.

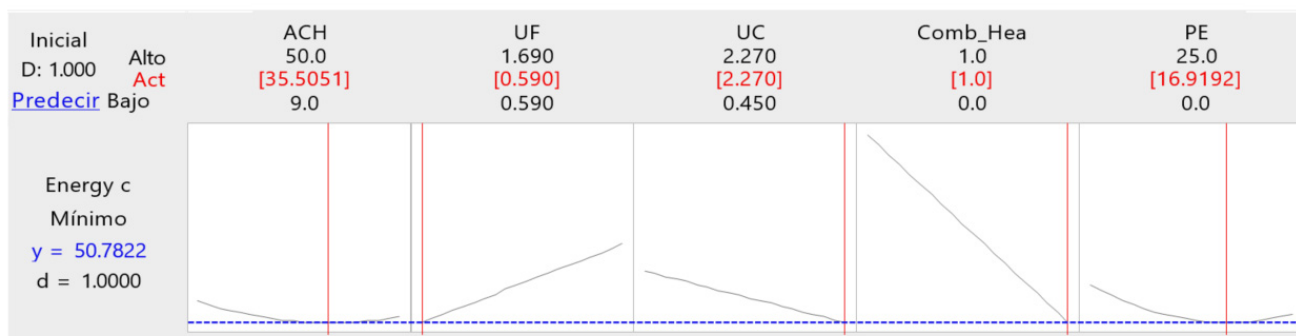


Figura 98. Optimización numérica del modelo matemático.

### 5.2.2 OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA CON INVERSIÓN ECONÓMICA LIMITADA.

Tomando como referencia los resultados anteriores mostrados en la Tabla 37, se realizó una optimización polinómica con datos tabulados y mediante del algoritmo de gradiente reducido generalizado (GRG). Para este proceso de optimización se han utilizado valores estándar de cada variable de entrada como niveles de aislamiento, categoría de carpintería, etc. De esta forma, implementando las diferentes variables acotadas y tabuladas, se obtienen las diferentes combinaciones, pudiendo seleccionar la óptima para el límite de la inversión deseada.

En concreto, las posibles soluciones obtenidas, excluyendo aquella con una inversión económica superior a 100.000 euros (inversión máxima), han sido ordenadas de acuerdo con el consumo mínimo de energía, como se aprecia en la Tabla 7.

Tabla 38 Actuaciones ordenadas por consumo energético, con inversión máxima de 100.000 €

FILA	COSTE	CONSUMO DE E.PRIMARIA	ACH	UF	UC	COMB_CALOR	FV
	(€)	(W/m <sup>2</sup> K)	(W/m <sup>2</sup> K)	(kWh/m <sup>2</sup> año)	(kWh/m <sup>2</sup> año)		(Wp)
1	78.484	112,375	27	1,69	2,27	1	15.000
2	77.794	112,866	27	1,69	2,27	1	20.000
3	75.489	117,029	50	1,69	2,27	1	15.000
4	79.174	117,105	27	1,69	2,27	1	10.000
5	74.799	118,129	50	1,69	2,27	1	20.000
6	77.104	118,576	27	1,69	2,27	1	25.000
7	88.308	119,586	27	1,69	1,00	1	15.000
8	87.618	120,772	27	1,69	1,00	1	20.000

9	76.179	121,149	50	1,69	2,27	1	10.000
10	92.562	122,709	27	1,69	0,45	1	15.000
11	91.872	123,200	27	1,69	0,45	1	20.000
12	88.998	124,316	27	1,69	1,00	1	10.000
13	74.109	124,449	50	1,69	2,27	1	25.000
50	87.382	154,889	50	1,69	1,00	1	0.000
51	83.548	157,134	9	1,69	2,27	1	0.000
52	91.636	159,150	50	1,69	0,45	1	0.000
53	93.371	162,288	9	1,69	1,00	1	0.000
54	97.626	164,519	9	1,69	0,45	1	0.000
55	74.114	174,983	27	1,69	0,45	0	10.000

En nuestro caso de estudio, se puede observar que, para realizar una inversión en eficiencia con un presupuesto máximo de 100.000 euros, hay muchas combinaciones, pero la que obtiene el mayor nivel de eficiencia energética es la de emplear una carpintería categoría 2 (media), transmitancia de fachada 1,69 (la actual), transmitancia de cubierta 1, cambio a gas natural como combustible e incorporación de producción eléctrica fotovoltaica (15 kWp). Esta inversión corresponde a 78.484 euros y reduce el consumo a 112,375 kWh/m<sup>2</sup>, como podemos ver en la Tabla 38, fila 1. Esta conclusión está en claro acuerdo con los resultados anteriores y muestra que solo una reducción de la inversión en la fachada es suficiente para reducir el coste y, en consecuencia, debe ser la variable inicial a analizar a la hora de tomar esta decisión tan importante.

Nuevamente, en la Tabla 38, fila 1, se puede observar que una inversión económica moderada o incluso baja, alcanzará el mayor ahorro energético después de cambiar la caldera a gas natural (1), quedando la transmitancia en fachada y cubierta en sus valores actuales y solo modificando los valores de la carpintería a un nivel medio (categoría 2), además de incorporar la producción eléctrica fotovoltaica.

A su vez, tal y como se puede observar en fila 55, actuar sobre la cubierta sin cambiar la caldera, representan un coste muy similar, pero observamos que el impacto energético es mucho peor que el alcanzado cambiando la caldera, sin modificar la cubierta. En consecuencia, se puede observar que la transmitancia máxima (la peor) en la fachada permanece como uno de los parámetros más importantes ligados a esta lista de bajo consumo energético.

Como se explicó anteriormente, si la optimización numérica se realiza sin limitación alguna y considerando que todas las variables sean continuas, el consumo mínimo de energía se define en:

- 35,5 ACH, renovaciones de aire.
- 0,59 UF, valor de transmitancia de fachada.
- 2,27 UC, valor de transmitancia de cubierta.
- cambiando la generación a gas natural.
- y con una generación fotovoltaica de 16.910 kWp,

tal y como podemos ver en la Figura 98. Es más, si ahora el coste se limita a un valor fijo de 100.000 euros, la propuesta de actuaciones para un consumo energético mínimo, es similar a la situación ideal y solo una pequeña mejora en carpintería (de 35,50 m<sup>3</sup>/h·m<sup>2</sup> a 33,02 m<sup>3</sup>/h·m<sup>2</sup>), como podemos ver en la Figura 99.

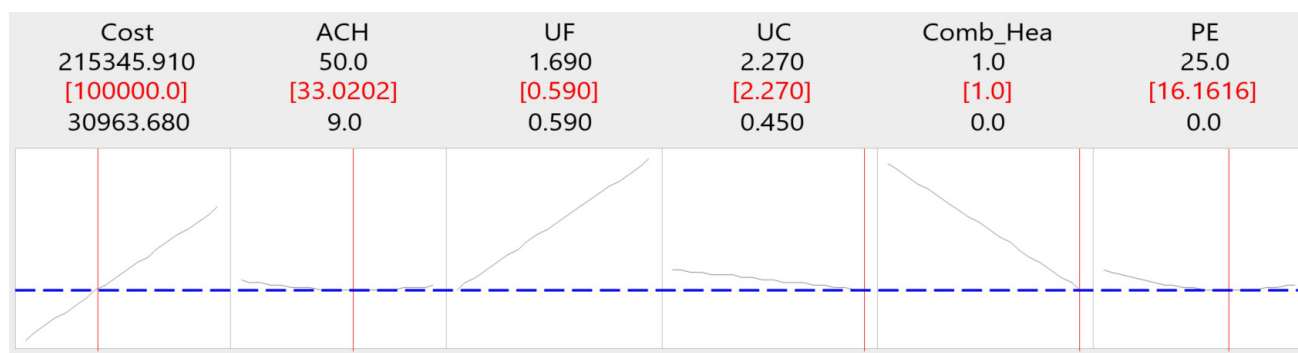


Figura 99. Optimización numérica del modelo limitado a una inversión de 100.000 €

## 6 CONCLUSIONES

Estructuramos las conclusiones de esta tesis, en dos partes:

- las conclusiones derivadas del **impacto de la gestión técnica de las instalaciones (domótica)**, en aquellos edificios que lo incorporan, y aquellos en los que no disponen de dicha gestión, a pesar de disponer de idénticas instalaciones;
- las conclusiones derivadas del **uso del modelo obtenido** mediante aplicación de método de Montecarlo.

### 6.1 IMPACTO DE LA GESTIÓN TÉCNICA DE LAS INSTALACIONES EN LA CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA

Los resultados obtenidos del análisis de la información registrada en todos los edificios monitorizados refleja en mayor o menor medida unas desviaciones tanto en los valores iniciales de partida, *(los consumos reales antes de la actuación son inferiores a los reflejados en la certificación inicial)*, como en los resultados finales tras la reforma *(la mayor parte de los casos el consumo de energía primaria no renovable tras la actuación es inferior a la establecida por la certificación energética)*.

Sin embargo, donde los resultados obtenidos sí empiezan a ser parejos, es en el porcentaje de ahorro entre el “antes” y el “después” de la actuación. En todos los casos se produce un ahorro energético real que en valores porcentuales es similar al reflejado en las certificaciones energéticas.

Del estudio de los datos en profundidad se recogen casos impactantes como el obtenido en el edificio Nº 6 en el que las actuaciones no implicaban más que un cambio de combustible de gasoil a gas, manteniendo la regulación, hidráulica y demás componentes. Su certificación energética curiosamente, se mantenía en casi los mismos valores, incluso en lugar de mejorar, empeoraba mínimamente *(un 0,9% de incremento en energía primaria no renovable)*, al solo considerar el factor de conversión de energía a energía primaria. La realidad fué bien distinta, ya que como se puede observar tras la reforma, la instalación ha procedido a reducir el consumo de energía primaria no renovable del orden de un 37%, incluso aumentando la ocupación del edificio.

El motivo de este ahorro, no contemplado en la certificación energética, precisamente surge de la modificación de esa transformación, ya que el cambio de quemadores para el nuevo combustible se realizó incorporando módulos electrónicos de regulación que permiten hacer modular a los quemadores. Esto evita los constantes arranques y paradas.

Además, al implementar el prototipo de lectura y proceder a la medición de energía, se detectó que las calderas, temporizaban las bombas circuladoras de primario con la idea de seguir disipando la energía que quedaba en el cuerpo de la caldera. Esta circunstancia hacía que se enfriase el cuerpo muy rápidamente y la

temporización tomaba energía del tanque de inercia y la devolvía a las calderas con la consiguiente pérdida de energía en el hogar de la caldera. De forma puntual se sustituyó este temporizador por una sonda de temperatura que realizase la misma función, pero tipo termostato, subsanó ese error y también eliminó la pérdida de energía que esto ocasionaba. Todas estas actuaciones, unidas a la modulación de los quemadores han hecho que las mismas calderas aumenten considerablemente sus prestaciones estacionales anuales, lo que se ve reflejado en un ahorro de energía primaria no renovable de más de un 35%. De disponer de un sistema de gestión técnica adecuado este ahorro ya se vendría produciendo años atrás.

Por el contrario, hay certificaciones energéticas como la del edificio Nº 7 que, si bien la certificación final plantea un ahorro del 35%, la realidad es que no han ahorrado nada respecto del consumo real inicial. No se trata de ningún error, sino que el consumo inicial era bajo debido a que el número de horas de calefacción estaba limitado a muy pocas horas, y tras la reforma este servicio se ha extendido el horario del servicio en un 33%. La instalación ha implementado un sistema de gestión técnica adecuado, se ha rediseñado por completo la instalación y esto ha permitido ahorros considerables motivados por:

- El uso de válvulas termostáticas en los radiadores.
- La incorporación de repartidores de coste (que provocan un ahorro psicológico).
- Aumento del rendimiento estacional anual que supera el 92%.

Ninguna de estas actuaciones se contempla por ninguna herramienta de certificación energética, siendo actuaciones que han producido ahorros superiores al 30%.

En otro ámbito del análisis se observa que los edificios de tipo 2 que han implementado herramientas de gestión técnica de la instalación, y en los que se ha adaptado el diseño térmico y su control a bajas temperaturas que aprovechen la condensación, han conseguido valores de rendimiento estacional anual medios de un **91,80%** frente a los rendimientos estacionales anuales de los edificios tipo 1 que se encuentran en la media del **81,55%**.

La explicación gráfica de este aumento del rendimiento estacional, puede deducirse de la Figura 82 y Figura 83, donde se aprecia el comportamiento de una sala de calderas tipo 1 para el mantenimiento del agua caliente sanitaria, mientras que en la Figura 83 se observa el mismo comportamiento de una sala de calderas tipo 2.

La herramienta de certificación tipo CE<sup>3</sup>X, permiten modificar manualmente el rendimiento estacional de las instalaciones, lo que nos permitiría ajustar el resultado de la certificación final. No obstante, y tras los resultados obtenidos, la diferencia entre una misma generación, con idéntica marca y modelo de generador, se observa que proporciona rendimientos estacionales anuales un 10% mejores, simplemente disponiendo de un sistema de gestión técnica adecuado.

Por otro lado, y tras evaluar las diferentes posibilidades de actuación en los edificios, se ha podido constatar que la búsqueda de la optimización energética de un edificio a nivel técnico siempre busca su óptimo energético, pero esta metodología de optimización no tiene presente ni los costes de inversión, ni los de operación y mantenimiento a medio y largo plazo. La mayor parte de las herramientas de certificación energética dispone de herramientas automáticas que nos facilitan medidas de mejora automáticas que consiguen reducir la demanda de energía primaria no renovable del edificio. A pesar de que el R.D. 235/2013 [101] de certificación energética de los edificios ya contempla la recomendación de incluir en las propuestas de mejora una estimación de los plazos de recuperación de la inversión, casi nadie contempla dichos plazos. Y en todo caso, estos no son analizados a la hora de priorizar las propuestas al cliente.

La máxima inversión en eficiencia, como ya se ha demostrado, no garantiza ni el mayor ahorro energético, ni la mayor recuperación de la inversión. Además de esto las desviaciones observadas entre los modelos de certificación energética y los valores reales registrados, se justifica la necesidad de buscar la modelización de los edificios para obtener la optimización energética y económica de todas las posibilidades de actuación. La solución a este problema se ha tratado de resolver, diseñando e implementando **la metodología expuesta** basada en el método de Montecarlo, generando luego con ayuda de las superficies de respuesta un modelo matemático que nos permite optimizar la inversión en eficiencia. Esta metodología de forma gráfica se encuentra descrita en la Figura 97.

## 6.2 APLICACIONES DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DISEÑADO

Además de las conclusiones obtenidas sobre la influencia que ejerce el uso de los sistemas de regulación y control domótico en la certificación energética de los edificios, se ha procedido a dar solución a la idea de buscar la mejor solución técnica a la necesidad de optimizar energéticamente un edificio.

Considero que esta metodología de optimización podría implementarse dentro de las aplicaciones actuales de certificación energética, con el fin, no solo de dar posibilidades de optimización, sino ajustar estas a niveles óptimos de rentabilidad, tal y como se establece en el decreto español de certificación energética de los edificios, y la comisión europea en el Reglamento Delegado Nº 244 [102] relativo al establecimiento de un marco metodológico comparativo que calcule los niveles óptimos de rentabilidad en los requisitos de eficiencia energética de los edificios.

Por otro lado, la mayor parte de las actuaciones en edificios existentes, sobre todo del ámbito residencial, las actuaciones de eficiencia se realizan cuando existe la necesidad imperiosa de actuar. De hecho, la mayor parte de las veces, no se trata de una actuación que busque la eficiencia energética, solo se buscar la



reparación, subsanación o restauración de algún sistema de edificio que ha sufrido daños de una envergadura tal, que no se solucionan con una simple reparación.

Algunos ejemplos:

- Sustitución de tuberías
- Cambio de tejado.
- Reparación de fachadas.
- Cambio de calderas.
- Cambio de combustible.
- Etc.

Sin embargo, desde la entrada en vigor en el año 2013 del R.D. 235/2013 sobre la certificación energética de los edificios, los propietarios comienzan a familiarizarse con los conceptos de la eficiencia energética. Todo esto unido al aumento incesante de los precios de la energía, los cambios en la legislación sobre combustibles fósiles, en concreto con el carbón e hidrocarburos; están provocando que el interés por la eficiencia energética, la inversión en nuevas formas de generación de energía, la incorporación de energías renovables, nuevos aislamientos de fachada, carpintería exterior y renovación de aire, tengan cada vez más interés.

Todo esto, además, provoca en el mercado una activación en este sentido que ayuda a reducir costes y precios. Con este marco, cada vez es más frecuente la necesidad de conocer cual, de las múltiples soluciones disponibles es la óptima para cada edificio.

Como se ha podido demostrar, la búsqueda del óptimo en cada caso depende de muchas variables que finalmente forman parte de un modelo matemático que debe ser optimizado en base a unas premisas que como todo están condicionadas por la inversión y los costes de operación.

La idea de optimizar un edificio poniendo la mejor fachada, la mejor carpintería, la mejor generación térmica, etc, es sinónimo de éxito, si bien, como hemos podido comprobar, un exceso de aislamiento provocará una demanda de generación de frío que inicialmente no se tenía, y esto provocará una peor certificación energética. Todo esto además sin tener en cuenta los costes de la inversión.

En la mayor parte de los casos, la respuesta a cuál es la mejor actuación para el edificio debería partir del importe de ejecución material disponible para las obras. En este caso, el problema ahora será formulado como:

*“¿Cuál, o cuales, de las actuaciones posibles en eficiencia, son las óptimas en este edificio para una inversión máxima de 100.000 €?”*

Para dar respuesta a estas cuestiones, se plantea el modelo de optimización energética desarrollado.

A la vista de la evolución tecnológica en materia de generación térmica (*nuevas bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas*), uso de nuevos refrigerantes naturales (R290, R744, R600), normalización en el uso de la tecnología fotovoltaica, almacenamiento de energía térmica y eléctrica con baterías, etc, cada vez es más importante la utilización de un mix energético en el propio edificio, de manera que toda la generación térmica no proceda exclusivamente de un combustible fósil, o uno totalmente renovable.

El dimensionar una instalación con bomba de calor para cubrir el 100% de la demanda energética de un edificio, provoca una inversión muy elevada y que probablemente no se recupere en los años de vida útil de los equipos. Lo correcto en este caso será implementar una instalación híbrida entre bomba de calor y una caldera a gas, por ejemplo, que se encargue de cubrir las puntas de demanda que la bomba no puede atender. Esta misma instalación se puede combinar con otras energías renovables como la fotovoltaica o mini eólica, dependiendo de la ubicación y características del edificio.

Como trabajo futuro, en base a los resultados obtenidos, se plantea el uso del modelo de optimización energética desarrollados, no solo para determinar qué actuaciones, optimizan la inversión, sino qué porcentaje de distribución del mix de generación hace que la instalación sea lo más eficiente y rentable posible.

## 7 ANEXOS

### 7.1 CÓDIGO FUENTE DEL PROTOTIPO DE LECTURA DE CONTADORES.

#### 7.1.1 ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS:

```
-- phpMyAdmin SQL Dump
-- version 4.2.12deb2+deb8u9
-- http://www.phpmyadmin.net
-- Servidor: localhost
-- Tiempo de generación: 26-09-2020 a las 19:20:20
-- Versión del servidor: 5.5.62-0+deb8u1
-- Versión de PHP: 5.6.40-0+deb8u12
SET SQL_MODE = "NO_AUTO_VALUE_ON_ZERO";
SET time_zone = "+00:00";

--
-- Base de datos: `mbus`
--
CREATE DATABASE IF NOT EXISTS `mbus` DEFAULT CHARACTER SET latin1 COLLATE latin1_swedish_ci;
USE `mbus`;

-----
--
-- Estructura de tabla para la tabla `contadores`
--
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `contadores` (
  `id` bigint(20) NOT NULL,
  `id_cnt` varchar(20) NOT NULL,
  `id_primaria` varchar(20) NOT NULL,
  `descripcion` varchar(50) NOT NULL,
  `manufacturer` varchar(20) NOT NULL,
  `version` varchar(20) NOT NULL,
  `medium` varchar(20) NOT NULL,
  `accessnumber` varchar(20) NOT NULL,
  `status` varchar(20) NOT NULL,
  `signature` varchar(20) NOT NULL,
  `Tipo` varchar(3) NOT NULL,
  `Datarecord` int(11) NOT NULL,
  `Escala` double NOT NULL,
  `Unidad` int(11) NOT NULL,
  `Tipo2` varchar(3) NOT NULL,
  `Datarecord2` int(11) NOT NULL,
  `Escala2` double NOT NULL,
  `Unidad2` int(11) NOT NULL
) ENGINE=InnoDB AUTO_INCREMENT=154 DEFAULT CHARSET=latin1;

-----
--
-- Estructura de tabla para la tabla `lecturas`
--
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `lecturas` (
  `id_lectura` bigint(20) NOT NULL,
  `id_cnt` varchar(20) NOT NULL,
  `Fecha_lectura` timestamp NOT NULL DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP ON UPDATE CURRENT_TIMESTAMP,
  `lectura` varchar(20) CHARACTER SET utf8 COLLATE utf8_spanish_ci NOT NULL,
  `valor` bigint(20) NOT NULL,
```

```

`unidad` varchar(100) CHARACTER SET utf8 COLLATE utf8_spanish_ci NOT NULL,
`Tipo` varchar(3) CHARACTER SET utf8 COLLATE utf8_spanish_ci NOT NULL,
`status` varchar(10) NOT NULL,
`raw` blob NOT NULL
) ENGINE=InnoDB AUTO_INCREMENT=34504 DEFAULT CHARSET=latin1;
--
-- Índices para tablas volcadas
--
-- Indices de la tabla `contadores`
--
ALTER TABLE `contadores`
ADD PRIMARY KEY (`Id`);
--
-- Indices de la tabla `lecturas`
--
ALTER TABLE `lecturas`
ADD PRIMARY KEY (`Id_lectura`);
--
-- AUTO_INCREMENT de las tablas volcadas
--
-- AUTO_INCREMENT de la tabla `contadores`
--
ALTER TABLE `contadores`
MODIFY `Id` bigint(20) NOT NULL AUTO_INCREMENT,AUTO_INCREMENT=154;
--
-- AUTO_INCREMENT de la tabla `lecturas`
--
ALTER TABLE `lecturas`
MODIFY `Id_lectura` bigint(20) NOT NULL AUTO_INCREMENT,AUTO_INCREMENT=34504;

```

### 7.1.2 CÓDIGO FUENTE DE LA APLICACIÓN WEB

Esta aplicación está formada por varios archivos. Su estructura es la siguiente:

#### 7.1.2.1 INDEX.HTML:

```

<html>
  <head>
    <title>Lectura Remota de Contadores</title>
  <style type="text/css">
    h1{font-family:Helvetica}
    h2{font-family:Helvetica}
    p{font-family:Helvetica}
    p{font-family:Helvetica}
    h3{font-family:serif}
    table {
      border: 1px solid black;
    }
  </style>
  </head>
  <body>

```

```


<p>
<h2>SERVIDOR DE LECTURA DE CONTADORES M-BUS.</h2>

<table align=center ><tr><td><b>DIRECCION:</b></td><td>AVENIDA DEL
EJ&Eacute;RCITO, N 8<BR>NOVOA SANTOS, N 1-3<BR> MANUEL PI&Nacute;EIRO POSE, N 2
</br>
    LA CORU&Nacute;A</td></tr>
<tr><td><b>N. Contadores</b></td><td>76 ACS<br>0 Calefaccion<br>3
Generales</td></tr>
<tr><td></td></tr>

</table>

        <h2>SELECCIONE OPCION</h2>
        <table align=center>
            <tr><td><a href="entre.php"></a></td><td>Descargar lecturas ENTRE FECHAS</td></tr>
            <tr><td><a href="fecha.php"></td><td>Dercargar
lecturas de UNA FECHA: <a href="fecha.php">aqui</a></td></tr>
            <tr><td><a href="visualizabd.php"></td><td>Ultimas lecturas conseguidas: <a
href="visualizabd.php">aqui</a></td></tr>
        </table>
NOTA: Se recomienda utilizar Firefox o Chrome.
</body>
</html>

```

### 7.1.2.2 VISUALIZABD.PHP

```

<style type="text/css">
h1{font-family:Helvetica}
h2{font-family:Helvetica}
p{font-family:Helvetica}
p{font-family:Helvetica}
h3{font-family:serif}
table {
    border: 1px solid black;
}
tr:nth-child(even) {background-color: #f2f2f2}
</style>
<?php
require_once("config/dbcontroller.php");
$db_handle = new DBController();
$conexion=$db_handle->connectDB();
$conexion_db=$db_handle->selectDB($conexion);
$sql_before = "CREATE TEMPORARY TABLE ids (SELECT max(Id_lectura) AS id FROM
lecturas GROUP BY Id_cnt)";
$db_handle->runQuery($conexion,$sql_before);
$sql = "
SELECT
    1.Id_lectura AS id_lectura,
    1.Id_cnt AS id_mbus,
    1.Fecha_lectura AS fecha,
    1.lectura AS lectura,

```

```

        l.valor AS valor,
        l.unidad AS unidad,
        l.Tipo AS tipo,
        l.status AS status,
        c.id_cnt AS serial,
        c.descripcion AS descripcion
FROM
    lecturas AS l
INNER JOIN
    ids ON (l.Id_lectura=ids.id)
INNER JOIN
    contadores AS c ON (c.id_primaria = l.Id_cnt)
ORDER BY
    id_mbus, id_lectura
";

$results = $db_handle->runQuery($conexion,$sql);
$sql_after = "DROP TEMPORARY TABLE ids";
$db_handle->runQuery($conexion,$sql_after);
?>

<html>
    <head>
        <title>Lectura automatica de contadores</title>
    </head>
    <body>
        <h3>Lectura automatica de contadores</h3>
        <table border>
            <tr>
                <th>Idlectura</th>
                <th>N mBus</th>
                <th>N_Serie</th>
                <th>Descripcion</th>
                <th>Fecha</th>
                <th>lectura</th>
                <th>kW-litros</th>
                <th>Unidad</th>
                <th>Tipo</th>
                <th>Status</th>
            </tr>
<?php
//Print the results
foreach($results as $result) {
    echo "                <tr>\n";
    echo "                <td>". $result['id_lectura']. "</td>\n";
    echo "                <td>". $result['id_mbus']. "</td>\n";
    echo "                <td>". $result['serial']. "</td>\n";
    echo "                <td>". $result['descripcion']. "</td>\n";
    echo "                <td>". $result['fecha']. "</td>\n";
    echo "                <td>". $result['valor']. "</td>\n";
    echo "                <td><b>". $result['lectura']. "</b></td>\n";
    echo "                <td>". $result['unidad']. "</td>\n";
    echo "                <td>". $result['tipo']. "</td>\n";
    echo "                <td>". $result['status']. "</td>\n";
    echo "                </tr>\n";
}
?>

        </table>

<p><br>

```

```
<center><h5>&copy; Antonio E. Masdias y Bonome.</h5></center>
</body>
</html>
```

### 7.1.2.3 CONFIG/DBCONTROLLER.PHP

```
<?php
class DBController {
    private $host = "localhost";
    private $user = "root";
    private $password = "petete";
    private $database = "mbus";

    function __construct() {
        $conn = $this->connectDB();
        if(!empty($conn)) {
            $this->selectDB($conn);
        }
    }

    function connectDB() {
        $conn = mysqli_connect($this->host,$this->user,$this->password);
        return $conn;
    }

    function selectDB($conn) {
        mysqli_select_db($conn,$this->database);
    }

    function runQuery($conn,$query) {
        $result = mysqli_query($conn,$query);
        while($row=mysqli_fetch_assoc($result)) {
            $resultset[] = $row;
        }
        if(!empty($resultset))
            return $resultset;
    }

    function numRows($conn,$query) {
        $result = mysqli_query($conn,$query);
        $rowcount = mysqli_num_rows($result);
        return $rowcount;
    }

    function getLastRecord($conn,$meter_id) {
        $query = "SELECT * FROM lecturas WHERE Id_cnt=".$meter_id." ORDER
BY Fecha_lectura DESC LIMIT 1";
        return mysqli_query($conn,$query);
    }

    function getGeneralLastRecord($conn) {
        return $this->getMainMeterLastRecord($conn,'GRL');
    }

    function getACSLastRecord($conn) {
```

```

        return $this->getMainMeterLastRecord($conn, 'AC1');
    }

    function getACSRecirculacionLastRecord($conn) {
        return $this->getMainMeterLastRecord($conn, 'ACR');
    }

    private function getMainMeterLastRecord($conn, $type) {
        $query = "SELECT lectura FROM lecturas WHERE Id_cnt IN (Select
id_primaria FROM contadores WHERE Tipo='". $type. "') ORDER BY Fecha_lectura DESC
LIMIT 1";

        $result =mysqli_query($conn, $query);
        $row=mysqli_fetch_row($result);
        return $row[1];
    }
}
?>

```

#### 7.1.2.4 ENTRE.PHP

```

<html>
<head>Consulta de historico
</head>
<body>
<h1> Introduce Fechas para descargar el intervalo de lecturas</h1>
<form name="formulario" method="post" action="calcula.php">
    Fecha Desde: <input type="date" name="desde" step="1" min="2016-01-01"
max="2016-12-31" value="2016-01-01">
    Fecha Hasta: <input type="date" name="hasta" step="1" min="2016-01-01"
max="2016-12-31" value="2016-01-01">
    <input type="submit" />
</form>
</body>
</html>

```

#### 7.1.2.5 CALCULA.PHP

```

<?php
require_once("config/dbcontroller.php");
?>
<html>
<head>
<title>Listado de lecturas</title>
</head>
<body>
<?php
$antes = $_POST['desde'];
$despues = $_POST['hasta'];

if (strtotime($antes)>=strtotime($despues)) {
    echo "<h3>Las fechas no son correctas</h3><br>";
    exit();
}

```



```

$db_handle = new DBController();
$sql = "
SELECT
    t1.Id_lectura as old_Id_lectura,
    t1.Id_cnt as old_Id_cnt,
    t1.Fecha_lectura as old_Fecha_lectura,
    t1.lectura as old_lectura,
    t1.valor as old_valor,
    t1.unidad as old_unidad,
    t2.Id_lectura as new_Id_lectura,
    t2.Id_cnt as new_Id_cnt,
    t2.Fecha_lectura as new_Fecha_lectura,
    t2.lectura as new_lectura,
    t2.valor as new_valor,
    t2.unidad as new_unidad,
    (t2.valor - t1.valor) AS dif_valor,
    (t2.lectura - t1.lectura) AS dif_lectura,
    t3.descripcion as descripcion
FROM
    lecturas AS t1, lecturas AS t2, contadores AS t3
WHERE
    t1.Fecha_lectura LIKE '". $antes. "%' AND
    t2.Fecha_lectura LIKE '". $despues. "%' AND
    t1.Id_cnt = t2.Id_cnt AND
    t1.Tipo = t2.Tipo AND
    t1.Id_cnt = t3.id_primaria
ORDER BY
    t2.Id_cnt
";
$results = $db handle->runQuery($sql);

// Headers and Columns
$headers = [ 'N° Contador', 'Descripcion', 'Id lectura', 'Fecha Inicial',
    'Valor', 'Lectura', 'Unidad', 'Id lectura', 'Fecha Final',
    'Valor', 'Lectura', 'Unidad', 'Diferencia Valor',
    'Diferencia lectura' ];
$columns = [ 'old_Id_cnt', 'descripcion', 'old_Id_lectura', 'old_Fecha_lectura',
    'old_lectura', 'old_valor', 'old_unidad', 'new_Id_lectura',
    'new_Fecha_lectura', 'new_lectura', 'new_valor', 'new_unidad',
    'dif_lectura', 'dif_valor' ];

// Excel file
$i = 2;
}
?>
    <p>Se descargan las lecturas de fechas <?php echo $antes; ?> y <?php echo
    $despues; ?>
    <p>Ahora vamos a calcular el consumo de cada contador entre esas fechas
    <table border>
        <tr>
        </tr>
    </table>
</body>
</html>

```

### 7.1.2.6 FECHA.PHP

```
<html>
  <head>Consulta LECTURAS DE UN DIA ESPECIFICO
  </head>
  <body>
<?php
$hoy=date("Y-m-d");
?>
    <h1> Introduce Fecha del dia que se desea conocer la lectura</h1>
<font color="red"><B>NOTA:</B> Es importante saber que si ese dia no fué posible
leer ese contador, se dará la fecha próxima mas cercana en la que se pudo
leer.</font>
    <form name="formulario" method="post" action="calcula_dia.php">
        Dia: <input type="date" name="hoy" step="1" min="2016-01-01" max="2036-
12-31" value="<?php echo $hoy; ?>">
        <input type="submit" />
    </form>
  </body>
</html>
```

### 7.1.2.7 CALCULA\_DIA.PHP

```
<style type="text/css">
h1{font-family:Helvetica}
h2{font-family:Helvetica}
p{font-family:Helvetica}
p{font-family:Helvetica}
h3{font-family:serif}
table {
    border: 1px solid black;
}
tr:nth-child(even) {background-color: #f2f2f2}
</style>
<?php
$hoy = $_POST['hoy'];
require_once("config/dbcontroller.php");
$db_handle = new DBController();
$conexion=$db_handle->connectDB();
$conexion_db=$db_handle->selectDB($conexion);
$sql_before = "CREATE TEMPORARY TABLE ids (SELECT max(Id_lectura) AS id FROM
lecturas WHERE Fecha_lectura<='".$hoy."' GROUP BY Id_cnt)";
$db_handle->runQuery($conexion,$sql_before);
$sql = "
SELECT
    l.Id_lectura AS id_lectura,
    l.Id_cnt AS id_mbus,
    l.Fecha_lectura AS fecha,
    l.lectura AS lectura,
    l.valor AS valor,
    l.unidad AS unidad,
    l.Tipo AS tipo,
    c.id_cnt AS serial,
    c.descripcion AS descripcion
FROM
    lecturas AS l
INNER JOIN
```

```

        ids ON (l.Id_lectura=ids.id)
INNER JOIN
        contadores AS c ON (c.id_primaria = l.Id_cnt)
ORDER BY
        id_mbus, id_lectura
";

$results = $db_handle->runQuery($conexion,$sql);
$sql_after = "DROP TEMPORARY TABLE ids";
$db_handle->runQuery($conexion,$sql_after);
?>

<html>
    <head>
        <title>Lectura de contadores on line</title>
    </head>
    <body>
        <h3>Lectura de contadores on line <?php echo $hoy; ?></h3>
        <table border>
            <tr>
                <th>Idlectura</th>
                <th>N°mBus</th>
                <th>N° Serie</th>
                <th>Descripcion</th>
                <th>Fecha</th>
                <th>lectura</th>
                <th>kW-litros</th>
                <th>Unidad</th>
                <th>Tipo</th>
                <th>Status</th>
            </tr>

<?php
//Print the results
foreach($results as $result) {
    echo "                <tr>\n";
    echo "                <td>".$result['id_lectura'].</td>\n";
    echo "                <td>".$result['id_mbus'].</td>\n";
    echo "                <td>".$result['serial'].</td>\n";
    echo "                <td>".$result['descripcion'].</td>\n";
    echo "                <td>".$result['fecha'].</td>\n";
    echo "                <td>".$result['valor'].</td>\n";
    echo "                <td><b>".$result['lectura'].</b></td>\n";
    echo "                <td>".$result['unidad'].</td>\n";
    echo "                <td>".$result['tipo'].</td>\n";
    echo "                <td></td>\n";
    echo "                </tr>\n";
}
?>

        </table>
    </body>
</html>

```

#### 7.1.2.8 LEE\_CONTADORES.PHP

```
<?php
```

```

echo "LECTURA DE CONTADORES ON LINE";
echo " Lo primero ... leemos BD";
// Accedemos a la Base de datos para leer todos los contadores que hay en la cola
require_once("config/dbcontroller.php");
$db_handle = new DBController();
// $sql = "SELECT * from contadores";
// Solo tenemos que leer los contadores que hoy no han sido leídos
$sql = "SELECT * FROM contadores WHERE id_primaria NOT IN ( SELECT id_cnt FROM
lecturas WHERE DATE(`Fecha_lectura`) = CURDATE() )";
$faq = $db_handle->runQuery($sql);
echo "<table
border><tr><th>INFO</th><th>N°Serie</th><th>Fabricante</th><th>Version</th><th>Me
dio</th><th>AccessNumber</th><th>Status</th><th>Signature</th><th>Elem_a_leer</th>
<th>VALOR</th><th>UNIDAD</th><th>N°_Elementos</th><th>VALOR</th><th>UNIDAD</th><
/tr>";
foreach($faq as $k=>$v) {
// Iniciamos bucle ... con cada CONTADOR:
$id_a_leer=$faq[$k]["id_primaria"];
$multiplicador=$faq[$k]["Escala"];
echo "<tr><td>Leyendo Id: ".$id_a_leer;
$orden_shell="mbus-serial-request-data -b 2400 /dev/ttyUSB0 ".$id_a_leer." ";
echo $orden_shell;
$comando_shell = shell_exec($orden_shell);
$xml = simplexml_load_string ($comando_shell);
$raw1=gzcompress($comando_shell, 9);
echo "MBusData es: " . count($xml->SlaveInformation);
if (count($xml->SlaveInformation)==0) echo "ERROR!";
// Recorremos todas las lecturas.
$i=1;
foreach ($xml->SlaveInformation as $lectura_)
{
    $hay=count($xml->DataRecord);
    $a=$faq[$k]["Datarecord"]; // Valor donde Leer Calefaccion
    $Tipo=$faq[$k]["Tipo"];
    $b=$faq[$k]["Datarecord2"]; // Valor donde leer ACS
    $Tipo2=$faq[$k]["Tipo2"];

    $z=0;$valor="";$unidad="";$valor2="";$unidad2="";
    foreach ($xml->DataRecord as $nodo)
    {
        if ($z==$a) {$valor=$nodo->Value; $unidad=$nodo->Unit;}
        if ($z==$b) {$valor2=$nodo->Value; $unidad2=$nodo->Unit;}
        $z=$z+1;
    }
    // Abro conexión para GRABAR LA LECTURA
    $conn = mysqli_connect('localhost', 'mbus','kalimero', 'mbus');
    // Check connection
    if (!$conn) {
        die("Connection failed: " . mysqli_connect_error());
    }
    $raw1=addslashes ($raw1);
    $raw2=addslashes ($raw2);
    $lectura=$valor*$multiplicador;
    $lectura2=$valor2*$multiplicador;
    $status=$lectura_->Status;
    $sql = "INSERT INTO lecturas
(Id_lectura,Id_cnt,Fecha_lectura,lectura,valor,unidad,Tipo,raw,status) VALUES
(NULL,'$id_a_leer', CURRENT_TIMESTAMP,
$lectura,$valor,$unidad,$Tipo,$raw1,$status)";

```

```

$sql2 = "INSERT INTO lecturas
(Id_lectura,Id_cnt,Fecha_lectura,lectura,valor,unidad,Tipo,raw,status) VALUES
(NULL,'$id_a_leer', CURRENT_TIMESTAMP,
$lectura2,$valor2,'$unidad2','$Tipo2','$raw1','$status')";
if (mysqli_query($conn, $sql)) {
    echo "<font color=green>OK</font>";
} else {
    echo "<font color=red>Error: </font>" . $sql . "<br>" . mysqli_error($conn);
}
if ($Tipo2=="ACS") {if (mysqli_query($conn, $sql2)) {    echo "<font
color=green>OK</font>";
                    } else {echo "<font
color=red>Error: </font>" . $sql2 . "<br>" . mysqli_error($conn);}
        }
    echo "</td><td>".$lectura_>Id."</td><td>".$lectura_>
>Manufacturer."</td><td>".$lectura_>Version."</td><td>".$lectura_>
>Medium."</td><td>".$lectura_>AccessNumber."</td><td>".$lectura_>
>Status."</td><td>".$lectura_>
>Signature."</td><td>".$a."</td><td>".$valor."</td><td>".$unidad."</td><td>".$hay
."</td><td>".$valor2."</td><td>".$unidad2."</td></tr>";
    $i=$i+1;
}
}
echo "</table>";
?>

```

### 7.1.3 SCRIPT CRONTAB PARA LECTURA AUTOMÁTICA

Se deberá incorporar en el directorio `/etc/cron.d/` un script denominado **leer\_contadores** cuyo contenido se limita a la siguiente línea :

```
0,15,30,45 * * * * root /usr/local/sbin/lee_horaria.sh
```

Este código realiza cada 15 minutos la ejecución del script `lee_horaria.sh`.

El script **lee\_horaria.sh** que se deberá almacenar en la carpeta `/usr/local/sbin/` a su vez presenta el siguiente contenido.

```
cd /var/www/html/visor/
```

```
sudo /usr/bin/php /var/www/html/visor/lee_contadores.php
```

## 7.2 REFERENCIAS

- [1] «DIRECTIVA SAVE. Eur-Lex. Diario Oficial de la Unión Europea.,» Unión Europea, 13 septiembre 1993. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A31993L0076>. [Último acceso: noviembre 2018].
- [2] I. D. L. G. P. A. P. A. & C. V. Ballarini, «Transformation of an office building into a nearly zero energy building (NZEB): Implications for thermal and visual comfort and energy performance,» *Energies*, vol. 12, nº 5, 2019.
- [3] X. F. G. C. D. L. M. & D. B. Xu, «Optimization of performance parameter design and energy use prediction for nearly zero energy buildings,» *Energies*, vol. 11, nº 12, 2018.
- [4] J. G. S. T. V. & K. A. Mishra, «An IoT based smart energy management system,» de *4th International Conference on Computing Communication and Automation, ICCCA 2018*, 2018.
- [5] S. L. Arenas., «La Casa Inteligente,» Fundesco. , 1991.
- [6] O. H. D. B. O. Elloumi, «KNX,» de *Chapter 6. The Internet of Things: Key Applications and Protocols*, John Wiley and Sons ISBN: 978-111999435-0, 2011, pp. 83-92.
- [7] «KNX Association,» [En línea]. Available: <https://www.knx.org/>. [Último acceso: enero 2020].
- [8] Ministerio de Ciencia y Tecnología., «R.D. 842/2002. Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión,» Boletín Oficial del Estado Nº 224, de 18 de septiembre de 2002, páginas 33084 a 33086, 2002.
- [9] «Página oficial del Código Técnico de la Edificación de España.,» [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/>. [Último acceso: enero 2019].
- [10] A. E. d. Normalización, «UNE-EN 15232-1:2018 Eficiencia energética de los edificios. Parte 1: Impacto de la automatización, el control y la gestión de los edificios,» AENOR, Madrid, 2018.
- [11] G. K. P. M. Z. Hayduk, «Building management system architecture for large building automation systems,» de *Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference, ICC 2016*, Slovakia, 27 June 2016, Article number 7501100, Pages 232-235.
- [12] J. & B. A. 2. Orosa, «Passive climate control in Spanish office buildings for long periods of time,» *Building and Environment*, vol. 43, nº 12, pp. 502-508, 2008.

- [13] H. A. M. & M. M. Khan, «Case study of a nearly zero energy building in Italian climatic conditions,» *Infrastructures*, vol. 2, nº 4, 2017.
- [14] J. O. A. Orosa, «Energy saving with passive climate control methods in Spanish office buildings,» *Elsevier: Energy and Buildings*, vol. 41, nº 8, pp. 823-828, agosto 2009.
- [15] J.-.. & B. D.-.. Chou, «Modeling heating and cooling loads by artificial intelligence for energy-efficient building design,» *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 437-446, 2014.
- [16] J. H. T. K. H. A. J. J. K. & K. C. Oh, «Advanced strategies for net-zero energy building: Focused on the early phase and usage phase of a building's life cycle,» *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, nº 12, 2017.
- [17] L. Guan, «The influence of internal load density on the energy and thermal performance of air-conditioned office buildings in the face of global warming,» *Architectural Science Review*, pp. 162-173, 2015.
- [18] A. a. B. U. ALKAR, «An internet based wireless home automation system for multifunctional devices,» *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 51, nº 4, pp. 1169-1173, 2005.
- [19] A. G. L. Ricardo García San José, «Rendimiento medio estacional en instalaciones de calefacción. Parte Teórica.,» IDAE, Madrid, 2017.
- [20] T. C. H. G. Y. & W. J. Ahmad, «A comprehensive overview on the data driven and large scale based approaches for forecasting of building energy demand: A review,» *Energy and Buildings*, vol. 165, pp. 301-320., 2018.
- [21] J. Orosa, «Thermal inertia and ISO 13790 - Have its effects on future energy consumption been fully considered?,» *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, vol. 29, nº 1, pp. 339-352, 2012.
- [22] «EFINOVA. Desarrolladores del software CE3X.,» Efinovatic, [En línea]. Available: <http://www.efinova.es/complementos/>. [Último acceso: diciembre 2019].
- [23] ATECYR, DTIE 7.03. Entrada de datos a los programas LIDER y CALENER Vyp., Madrid: ATECYR, 2008.
- [24] B. L. J. J. D. C. Barbara F. Ryan, MINITAB® Handbook: Updated for Release 16, Cengage Learning; 6a edición (28 Agosto 2012) ISBN 9781133939443, 2012.
- [25] G. o. S. Ministerio de Industria Energía y Turismo, «CALENER-VYP. V. 1.0 (Software),» Ministerio de Industria Energía y Turismo,, Madrid, 2010.



- [26] Ministerio de la Presidencia Government of Spain, «Real Decreto 235/2013, Procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios,» BOE, Madrid, 2013.
- [27] A. Atlanta, ASHRAE Handbook: HVAC Fundamentals, 1-197, Atlanta, GA, USA: Editorial Index, Spanish Edition, 2013.
- [28] G. Dell’Osso, F. Iannone y A. Pierucci, «Control Strategies of the Natural Ventilation for Passive Cooling for an Existing Residential Building in Mediterranean Climate.,» de *In Proceedings of the 36th AIVC-5th TightVent-3rd Venticool Conference*, Madrid, 23–24 September 2015..
- [29] I. O. M. Motawa, «A model for the complexity of household energy consumption,» *Energy and Buildings*, vol. 87, pp. 313-323, 2015.
- [30] N. O. J. R. G. Barkhudaryan, «A new procedure to analyze the effect of air changes in building energy consumption,» *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 12, nº 1, p. 37, 2014.
- [31] J. K. J. Jokisalo, «Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate,» *Energy and Buildings*, vol. 39, nº 2, pp. 236-247, 2007.
- [32] T. S. R. Y. P. M. H. Mahlia, «Development of a new adaptive comfort model for low income housing in the central-south of Chile,» *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, vol. 27, nº 1, pp. 95-104, 2011.
- [33] A. E. d. N. AENOR., «UNE-EN 1434-3:2016 Contadores de energía térmica. Parte 3: Intercambio de datos e interfaces,» AENOR, MAdrid, 2016.
- [34] L. M. B. & J. L. Jing, «Design of heat metering and temperature control system on the basis of M-Bus,» *Applied Mechanics and Materials*, Vols. %1 de %2Volumes 427-429, 2013.
- [35] M. Liu, «Development of heat meter based on the internet of things,» de *Proceedings - 2013 4th International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA* , 2013.
- [36] J. L. J. Y. Z. L. L. & Z. M. Ni, «A design of the urban well environment monitoring system based on M-BUS,» de *Advances in Computer Science and Information Engineering*, ISBN: 978-3-642-30222-0, 2012, pp. 535-540.
- [37] R. P. Foundation, «Raspberry Pi Foundation project,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/about/> . [Último acceso: 2018].

- [38] M. N. A. C. G. N. A. & K. A. Fatangare, «An Efficient Temperature Monitoring using Raspberry Pi,» de *Proceedings of the 5th International Conference on Inventive Computation Technologies, ICICT*, 2020.
- [39] A. m. M. S. R. & B. S. Pathak, «Smart mirror using raspberry pi,» *Int.J.Recent Trends Eng.Res.*, vol. 4, pp. 353-358, 2021.
- [40] A. E. d. N. AENOR., «UNE-EN 13757-2:2019 Sistemas de comunicación para contadores. Parte 2: Comunicación con cable M-Bus.,» AENOR, Madrid, 2019.
- [41] A. U.-E. 13757-2:2019, «UNE-EN 13757-2:2019 Sistemas de comunicación para contadores. Parte 2: Comunicación con cable M-Bus,» AENOR, 2019.
- [42] S. W. M. W. Z. Qi, «Design of intelligent concentrator basing on M-bus and embedded Linux,» de *2nd International Conference on Mechanics and Control Engineering,, Beijing; China*, 2013.
- [43] J. S. S. T. S. D. & D. A. Pateljayshri, «A review paper design and development of a Smart Mirror using Raspberry Pi,» *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, vol. 7, nº 4, pp. 40-43, 2018.
- [44] O. S. M. & S. A. Kehret, «A network emulation testbed for complex topologies of wired M-Bus according to EN13757,» *Journal of Communications*, vol. 11, nº 9, pp. 819-826, 2016.
- [45] A. L. P. A. N. D. M. R. D. & R. A. Sikora, «Recent advances in EN13757 based smart grid communication,» *Journal of Communications*, vol. 9, nº 9, pp. 658-664, 2014.
- [46] P. S. M. Z. K. M. R. O. A. H. J. Masek, «A perspective on wireless M-bus for smart electricity grids,» de *42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing, , Budapest; Hungary*, 2019.
- [47] M. Schneps-Schneppe, «M2M communications based on the M-bus protocol,» *Automatic Control and Computer Sciences*, vol. 46, nº 2, pp. 83-89, 2012.
- [48] C. o. t. E. Communities, Internet of Things - An Action Plan for Europe., Commission of the European Communities, 2009.
- [49] S. P. M. M. M. S. S. & G. E. Spinsante, «Evaluation of the wireless M-Bus standard for future smart water grids,» de *9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference IWCMC 2013, Sardinia, Italy*, 2013.

- [50] O. Hersent, *The Internet of Things: Key Applications and Protocols: M-Bus and Wireless M-Bus*, Wiley-Blackwell; 2nd Edition, 2012.
- [51] L. B. Jing, «Design of heat metering and temperature control system on the basis of M-Bus,» de *2nd International Conference on Mechanical Engineering, Industrial Electronics and Informatization*, , Chongqing; China, 2013.
- [52] A. M. J. M. A. M. J. P. N. Bonganay, «Automated electric meter reading and monitoring system using ZigBee-integrated raspberry Pi single board computer via Modbus,» de *IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, SCECS 2014*, Bhopal; India, 2014.
- [53] T. S. M. & S. A. Matt, «Development of a web-based monitoring device for the wired Metering Bus (M-Bus) as defined in EN13757-3,» de *Proceedings - 2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies, ICSGCE 2015*, 2016.
- [54] P. H. A. P. & M. A. Tonedewad, «A smart mirror Based on Raspberry pi,» *International Journal of research and Analytical Reviews*, vol. 6, nº 2, pp. 151-153, 2019.
- [55] A. K. R. G. D. & H. S. Banepali, «Design and Implementation of Wi-Fi Based Attendance System Using Raspberry Pi,» de *29th International Telecommunication Networks and Applications Conference, ITNAC*, Auckland, New Zealand, 2019.
- [56] T. Jamil, «Design and implementation of a wireleassautomatic meter reading system,» de *WorldCongress on Engineering.*, London, United Kingdom, 2008.
- [57] S. Monk, *Raspberry Pi Cookbook*, 3rd Edition, O'Reilly Media, Inc. ISBN 9781492043225, 2019.
- [58] J. A. F. K. N. S. M. C. J. R. J. W. W. & S. S. S. Belwyn Samson, «Smart energy monitoring using raspberrypi,» de *Proceedings of the 3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication, ICCMC 2019*, 2019.
- [59] A. B. V. B. M. H. J. S. G. Molderink, «Management and control of domestic smart grid technology,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, nº 2, pp. 109-119, 2010.
- [60] «Raspbian Jessie published.,» 29 septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/blog/raspbian-jessie-is-here/>. [Último acceso: noviembre 2018].

- [61] N. A. K. Mathew, «IoT based real time patient monitoring and analysis using Raspberry Pi 3,» de *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, ICECDS 2017*, Chennai; India, 2017.
- [62] F. J. G. Carraco, «An educational platform for residential and industrial energy monitoring,» de *51st International Universities Power Engineering Conference*, Coimbra; Portugal, 2017.
- [63] R. C. AB, «Raditex Control AB Web Site,» [En línea]. Available: <http://www.rscada.se/index.html?lang=en>. [Último acceso: agosto 2018].
- [64] «Sitio Web Oficial del proyecto MySQL,» [En línea]. Available: <https://www.mysql.com/>. [Último acceso: enero 2019].
- [65] M. P. J. P. V. Shah, «Development of Interactive Data Storage Unit Using Raspberry Pi,» de *Proceedings of the International Conference on Inventive Research in Computing Applications, ICIRCA 2018*, Coimbatore; India, 2018.
- [66] O. C. Inc., «Oracle Web site,» [En línea]. Available: <https://www.oracle.com/>. [Último acceso: agosto 2018 ].
- [67] M. B. A. Shcherbakov, «Development of a Hardware and Software System for Meteorological Observations,» de *8th International Scientific and Practical Conference on Information and Measuring Equipment and Technologies*, Tomsk State University (Faculty of Innovative Technologies)Tomsk; Russian Federation, 2018.
- [68] «Linux Shell Scripting Tutorial,» [En línea]. Available: <http://www.freeos.com/guides/lsst/>. [Último acceso: noviembre 2019].
- [69] I. D. d. P. y. Estudios, «Análisis del consumo energético del sector residencial en España PROYECTO SECH-SPAHOUSEC,» IDAE.  
[https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Informe\\_SPAHOUSEC\\_ACC\\_f68291a3.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Informe_SPAHOUSEC_ACC_f68291a3.pdf) , Madrid, 2011.
- [70] A. T. E. d. C. p. IDAE, Guía técnica de agua caliente sanitaria central, Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía ISBN: 978-84-96680-52-4, 2010.
- [71] Resolución conjunta de los Ministerios de Industria, Energía y Turismo, y Ministerio de Fomento, «FACTORES DE EMISIÓN DE CO2 y COEFICIENTES DE PASO A ENERGÍA PRIMARIA,» 14 enero 2016. [En

línea]. Available:

[https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores\\_emision\\_CO2.pdf](https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf). [Último acceso: noviembre 2018].

- [72] M. M.-M. M. Z. M. Carpio, «Comparative study by an expert panel of documents recognized for energy efficiency certification of buildings in Spain,» *Energy and Buildings*, vol. 99, nº Article number 5814, pp. 98-103, 2015.
- [73] Oscar Redondo Rivera, «APP 13790 v 7.5,» Oscar Redondo Rivera, 2018. [En línea]. Available: <https://oscarredondorivera.weebly.com/app-13790.html> . [Último acceso: diciembre 2018].
- [74] ANDIMAT, «Asociación Nacional de Fabricantes de Materiales Aislantes,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.andimat.es/sobre-aislamiento/rehabilitacion>.
- [75] «Código Técnico de la Edificación,» Ministerio de Vivienda, 2018. [En línea]. Available: <http://www.codigotecnico.org>. [Último acceso: enero 2018].
- [76] J. M. E. Haarhoff, «A Monte Carlo method for thermal building simulation,» *Energy and Buildings*, vol. 38, nº 12, pp. 1395-1399, 2006.
- [77] J. S. N. Keirstead, «Calculating minimum energy urban layouts with mathematical programming and Monte Carlo analysis techniques,» *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 35, nº 5, pp. 368-377, 2011.
- [78] G. F. K. V. D. Mavrotas, «Energy planning of a hospital using Mathematical Programming and Monte Carlo simulation for dealing with uncertainty in the economic parameters,» *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 722-731, 2010.
- [79] A. S. Srinivasa Rao, «On joint Weibull probability density functions,» *Applied Mathematics Letters*, vol. 18, nº 11, pp. 1224-1227, 2005.
- [80] S. S. Mohammad Arif, «Nexus between population density and novel coronavirus (COVID-19) pandemic in the south Indian states: A geo-statistical approach,» *PubMed* (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33144832/>), nº DOI: 10.1007/s10668-020-01055-8, octubre 2020.
- [81] «Sitio oficial de Minitab (c).,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.minitab.com>. [Último acceso: 2019].

- [82] T. G. J. F. R. & S. D. Norton, «Optimising the ventilation configuration of naturally ventilated livestock buildings for improved indoor environmental homogeneity. *Building and Environment*,» 2010. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.005>. [Último acceso: 2018].
- [83] K. & D. R. Singh, «Exergy optimization of cooling tower for HGSH and HVAC applications. *Energy Conversion and Management*,» [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.024>. [Último acceso: 2018].
- [84] S. R. Fisher, *The Design of Experiments*, London.: Oliver and Boyd. Edinburgh: Tweeddale Court, 1935.
- [85] E. E. M. M. V. & G. A. Martínez, «Aplicación de la metodología de superficie de respuesta para la optimización de parámetros de soldadura en función de la distribución térmica resultante.,» de *XII Congreso internacional de ingeniería de proyectos*, (págs. 476-489)., Badajoz, 2008.
- [86] K. K. N. & R. J. Carley, «Response surface methodology.,» *Carnegie-Mellon Univ. Pittsburgh PA School of Computer Science.*, 2004.
- [87] J. F.-S. L. C.-R. J. M.-G. I. C.-R. M. L.-G. H. Casteleiro-Roca, «Study of the effect of a geothermal heat exchanger over the ground,» de *2013 International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances*, Gijon - Asturias; Spain, 2013.
- [88] A. R. G. O. J. C.-R. J. C. A. Ghanghermeh, «New climatic indicators for improving urban sprawl: A case study of tehran city,» *Entropy*, vol. 15, nº 3, pp. 999-1013, 2013.
- [89] M. O. J. R. S. Nematchoua, «Climate change: Variabilities, vulnerabilities and adaptation analysis - A case of seven cities located in seven countries of Central Africa,» *Urban Climate*, vol. 29, nº Article number 100486, 2019.
- [90] K. M. B. R. T. C. Á. O. J. R. C. M. R. Modeste, «Resource potential and energy efficiency in the buildings of Cameroon: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, , vol. 50, nº 5, pp. 835-846, 2015.
- [91] L. O. J. P. C. Pérez-Lombard, «A review on buildings energy consumption information,» *Energy and Buildings*,, vol. 40, nº 3, pp. 394-398, 2008.
- [92] I. N. A. V. K. Sartori, «Net zero energy buildings: A consistent definition framework,» *Energy and Buildings*, vol. 48, pp. 220-232, 2012.

- [93] S. O. J. G. J. Fernández, «A new methodology to teach numerical methods with MS Excel,» *Journal of Maritime Research*, vol. 9, nº 2, pp. 29-32, 2013.
- [94] Y. Seong-Hwan and P. Cheol-Soo, "Objective building energy performance benchmarking using data envelopment analysis and Monte Carlo Sampling.," *Sustainability*, pp. 9, 780., 2017.
- [95] C. Favi, E. Di Giuseppe, M. D’Orazio, M. Rossi y M. Germani, « Building retrofit measures and design: A probabilistic approach for LCA.,» *Sustainability*, pp. 10, 3655., 2018.
- [96] «AERCCA. Asociación Española de Repartidores de Costes de Calefacción,» [En línea]. Available: <http://www.aercca.es/>.
- [97] Comisión Europea, «Una Unión de la Energía resiliente con una política de cambio climático que mire al futuro,» Comisión Europea, 19 junio 2018. [En línea]. Available: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_STATEMENT-18-3997\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_STATEMENT-18-3997_en.htm) . [Último acceso: diciembre 2018].
- [98] T. B. T. A.-S. D. V.-S. C. Gómez-Navarro, «Analysis of the potential for PV rooftop prosumer production: Technical, economic and environmental assessment for the city of Valencia (Spain),» *Renewable Energy*, vol. 174, pp. 372-381, 2021.
- [99] R. B. R. Singh, «Estimation of rooftop solar photovoltaic potential of a city,» *Solar Energy*, vol. 115, pp. 589-602, 2015.
- [100] T. E. C. s. a. k. service, «Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS),» 2018. [En línea]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=es&map=europe>. [Último acceso: agosto 2018].
- [101] Boletín Oficial del Estado, «Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios.,» BOE Nº89 de 13 de abril de 2013, 2013.
- [102] «REGLAMENTO DELEGADO (UE) N o 244/2012,» COMISIÓN EUROPEA, 16 enero 2012. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:081:0018:0036:ES:PDF>. [Último acceso: 2018].
- [103] J. A. Orosa, Quality Control, Delopments, Methods and Applications, UK: Nova Science Pub Inc, 2012, pp. (pp. 153-165)..





### 7.3 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la legislación y normativa hacia nZEB. ....	10
Figura 2. Pilares que sustentan el concepto de la “domótica” .....	13
Figura 3. Proceso de certificación mediante herramienta Ce3X y alternativa mediante hoja de cálculo. ....	18
Figura 4. Pantallazo general de la aplicación Minitab V18 utilizada. ....	20
Figura 5. Pantalla de introducción de datos en MINITAB para el diseño de la superficie de respuesta.....	21
Figura 6. Imagen del polinomio obtenido que define la respuesta del sistema ante las diferentes variables de entrada presentadas. ....	22
Figura 7. Vista del resumen del modelo calculado por Minitab, y el valor de $R^2$ .....	23
Figura 8. Entradas y salidas de los sistemas de evaluación energética de edificios como la ISO 13790.....	24
Figura 9. Esquema eléctrico del Modelo 5R1C descrito en la UNE EN ISO 13790:2011. ....	25
Figura 10. Modelo RC descrito en la UNE EN 52016 RC model. ....	26
Figura 11. Imagen de equipo de medida de energía general de sala de calderas. Fotografía: elaboración propia. ....	27
Figura 12. Raspberry PI 3. Model B. utilizada como soporte hardware para la adquisición de datos. ....	28
Figura 13. Vista del prototipo de medición encapsulado en caja tipo Phoenix para carril DIN. ....	29
Figura 14. Maestro M-Bus utilizado para leer la red de contadores. ....	29
Figura 15. Conversor RS232-USB para la comunicación con Maestro M-Bus. ....	30
Figura 16. Esquema Hardware utilizado para la adquisición de datos. ....	30
Figura 17. Ejemplo de resultado al escanear red mbus a 2400 baudios por el puerto USB0. ....	32
Figura 18. Ejemplo de valor XML de lectura del contador nº 32 por Mbus a la velocidad de 2400 baudios....	32
Figura 19. Gestión de la base de datos utilizada con la herramienta de código abierto phpMyAdmin. ....	33
Figura 20. Imagen de la herramienta phpMyAdmin en la exportación de datos a MS Excel. ....	34
Figura 21. Pantalla principal de la aplicación web desarrollada en el prototipo. ....	35
Figura 22. Distribución geográfica de los edificios analizados. ....	37
Figura 23. Representación de las dos tipologías de edificios analizados: con y sin sistema de gestión técnica de las instalaciones (Domótica). ....	38
Figura 24. Edificio 1: Vista General del edificio objeto de estudio. ....	40
Figura 25. Edificio 1. Fotografías del estado actual .....	41
Figura 26 Edificio 1. Fotografías del estado reformado .....	41
Figura 27. Edificio 1. La fotografía muestra prototipo de medición instalado.....	42
Figura 28. Edificio 1. Esquema de principio de la instalación reformada.....	43

Figura 29 Edificio 2: Vista General del edificio objeto de estudio.....	44
Figura 30. Edificio 2. Fotografías del estado actual. ....	45
Figura 31 Edificio 2. Fotografía del estado reformado.....	46
Figura 32. Edificio 3: Vista General del edificio objeto de estudio.....	47
Figura 33. Edificio 3: Vista en planta de los diferentes edificios atendidos. ....	47
Figura 34. Edificio 3. Fotografías del estado actual. ....	50
Figura 35 Edificio 3. Fotografía del estado reformado de la sala. ....	51
Figura 36. Edificio 3. Esquema de principio de la instalación reformada.....	52
Figura 37. Edificio 4: Vista General de ambos edificios objeto de estudio. ....	53
Figura 38. Edificio 4. Fotografías del estado actual. ....	54
Figura 39 Edificio 4: Estructura del edificio y ubicación de la sala de calderas.....	54
Figura 40. Edificio 3. Fotografía del estado reformado. ....	55
Figura 41. Edificio 4. Esquema de principio de la instalación reformada.....	56
Figura 42. Edificio 4. Colocación del prototipo de monitorización de energía en el edificio Nº 4.....	57
Figura 43. Edificio 5: Vista General del edificio objeto de estudio 66 viviendas entre medianeras. ....	58
Figura 44. Edificio 5. Fotografías del estado actual.....	59
Figura 45 Edificio 5. Fotografías del estado reformado.....	59
Figura 46. Edificio 6: Vista General del edificio residencial de 97 viviendas en la costa lucense objeto de estudio.....	61
Figura 47. Edificio 6. Fotografías del estado actual. ....	62
Figura 48. Edificio 6. Fotografía del estado reformado.....	62
Figura 49 Edificio 7: Vista General del edificio de 76 viviendas en La Coruña objeto de estudio.....	64
Figura 50. Edificio 7. Distribución en planta inicial y fotografías.....	65
Figura 51. Edificio 7. Vista 3D del BIM del nuevo diseño de la sala reformada y fotografías. ....	66
Figura 52. Normas españolas vinculadas a la UNE-EN ISO 13790. ....	69
Figura 53. Proceso de cálculo de la mayoría de las herramientas Excel para la implementación de la ISO 13790 existentes. ....	70
Figura 54 Descripción gráfica de la aplicación del método de Montecarlo a la UNE EN 13790. ....	70
Figura 55. Entrada de datos generales del edificio. ....	71
Figura 56. Entrada de valores para lanzar simulaciones aleatorias. ....	72
Figura 57. Ejemplo de Macro excel para copiar resultados de calculos obtenidos con la incorporación de variables aleatorias.....	75
Figura 58. Distribución de frecuencias de simulación de 200 iteraciones. ....	77
Figura 59. Vista de las herramientas de diseño de experimentos disponibles en Minitab (C). ....	80

Figura 60. Imagen del edificio piloto Nº 1, tomado como base de validación de resultados. ....	84
Figura 61. Resultados del cálculo de la certificación energética del edificio piloto .....	86
Figura 62. Gráfico comparativo entre herramienta CE <sup>3</sup> X y la hoja Excel.....	87
Figura 63. Gráfico comparativo entre herramienta CE <sup>3</sup> X y la hoja Excel de cada variación realizada a la envolvente. ....	89
Figura 64. Estado de partida de la sala de calderas del edificio piloto.....	90
Figura 65. Resultados del análisis técnico de las medidas de mejora resultantes según el CE <sup>3</sup> X. ....	90
Figura 66. Consumo de energía primaria no renovable obtenidos del certificado energético del edificio. ....	91
Figura 67. Distribución trianual del consumo energético [kWh/día] del edificio Nº1. ....	93
Figura 68. Distribución trianual del consumo energético [kWh/día] utilizado para ACS del edificio Nº1. ....	94
Figura 69. Distribución porcentual del consumo energético del Edificio 1.....	96
Figura 70. Desviación de la temperatura exterior respecto de las temperaturas medias mensuales para el emplazamiento del edificio 1. ....	97
Figura 71. Distribución mensual de consumos registrados en el Edificio 1. ....	98
Figura 72. Consumo de ACS en l/año por vivienda del Edificio 1, durante el periodo 2017-2019 .....	99
Figura 73. Consumo de CALEFACCION en kWh/año por vivienda del Edificio 1, durante el periodo 2017-2019 .....	99
Figura 74 Desviación de la temperatura exterior registrada respecto de la media considerada por la certificación energética del edificio. ....	100
Figura 75. Curva de regulación de temperatura de impulsión utilizada en el sistema de regulación. Ajuste 2,25. ....	101
Figura 76. Se muestra ubicación del contador de energía entre la generación y la inercia.....	107
Figura 77. Resumen de consumos y REA obtenidos de edificios TIPO 1, sin sistema de gestión técnica instalado. Fig. Superior: Consumo energético inicial - estimado y medido. Fig. Inferior: Distribución del rendimiento estacional anual.....	108
Figura 78. Resumen de consumos y REA obtenidos de edificios TIPO 2, con sistema de gestión técnica instalado. Fig. Superior: Consumo energético inicial - estimado y medido. Fig. Inferior: Distribución del rendimiento estacional anual.....	114
Figura 79. Distribución de la probabilidad de la demanda energética.....	116
Figura 80. Comparativa entre ahorro estimado en certificación energética y el real medido en las instalaciones .....	123
Figura 81. Distribución el REA y valor medio de los edificios Tipo 1 y Tipo 2 .....	124
Figura 82. Evolución de la temperatura de acumulación del ACS y % modulación de calderas en edificio Tipo 1. ....	125

Figura 83. Evolución de la temperatura de inercia y % modulación de calderas en edificio Tipo 2. ....	126
Figura 84. Valor límite de Energía Primaria no renovable a partir de la cual es considerado el edificio nZEB. .....	127
Figura 85. Criterios de modificación del CTE en el año 2018. Fuente: Ministerio de Fomento. ....	128
Figura 86. Vista general de complejo deportivo y dotacional objeto de estudio. ....	129
Figura 87. Vista actual de equipos de generación térmica Remeha P-320 de 2x150 kW en edificio de uso deportivo y dotacional. ....	129
Figura 88. Acumulador de ACS de 2500 litros. ....	130
Figura 89. Tabla B3. de la norma UNE 15.378:2007 que estima el R.E.A. de un generador en función del combustible y año de fabricación. ....	132
Figura 90. Consumo en litros/año de combustible del edificio. ....	139
Figura 91. Transmitancia actual del muro exterior del edificio. ....	140
Figura 92. Transmitancia futura del muro exterior del edificio. ....	140
Figura 93. Solución de mínimo coste de inversión. ....	144
Figura 94. Representación gráfica del Consumo obtenido y el Coste de la inversión ....	146
Figura 95. Distribuciones gráficas de los costes de cada inversión y sus combinaciones. Se destaca la de menor importe. ....	147
Figura 96. Ratio de inversión, ahorro anual y payback de cada actuación y sus combinaciones. ....	148
Figura 97. Descripción gráfica del modelo diseñado para la optimización energética y económica de los edificios. ....	149
Figura 98. Optimización numérica del modelo matemático. ....	153
Figura 99. Optimización numérica del modelo limitado a una inversión de 100.000 €. ....	155

#### **7.4 ARTÍCULO PUBLICADO**

A continuación, se adjunta copia de la publicación realizada sobre esta tesis, que lleva por título: "A new Methodology for Decision-Making in Buildings Energy Optimization" en la revista internacional Applied Sciences publicada por MDPI.



Article

# A New Methodology for Decision-Making in Buildings Energy Optimization

Antonio E. Masdías-Bonome <sup>1</sup>, José A. Orosa <sup>2,\*</sup> and Diego Vergara <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Engineering, E.T.S.NyM. University of A Coruña, Paseo de Ronda 51, 15011 A Coruña, Spain; antonio.masdias@udc.es

<sup>2</sup> Department of Energy and M.P., E.T.S.NyM. University of A Coruña, Paseo de Ronda 51, 15011 A Coruña, Spain

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Catholic University of Ávila, C/Canteros, s/n, 05005 Ávila, Spain; diego.vergara@ucavila.es

\* Correspondence: jaorosa@udc.es; Tel.: +34-981-167-000; Fax: +34-981-116-710

Received: 1 June 2020; Accepted: 28 June 2020; Published: 30 June 2020



**Featured Application:** A new methodology for decision-making at the time of building design or retrofit is shown.

**Abstract:** When designing or retrofitting a building, not too many tools let architects and engineers to define the optimal conditions to reduce energy consumption with the minimal economic investment. This is because different software resources must be employed and an iterative calculation must be done which, most of times, is not possible. The present study aims to define an original methodology that let researchers and architects to select the best option between different possibilities. To reach this objective, Monte Carlo method is employed on the ISO 13790 standard reaching the probability distribution of the energy consumption of each building after each possible modification. From main results, two mathematical models were obtained from a real case study showing the relation between annual energy consumption and economic investment of each different building retrofits. What is more, in disagreement with the expected result, the best retrofit option was not the one with the highest cost and qualities. In conclusion, this methodology can be a useful tool for researchers and professionals to improve their decision-making.

**Keywords:** energy saving; decision making; buildings; optimization; energy retrofit

## 1. Introduction

The energy consumption of the residential sector in the European Union represents 39% of CO<sub>2</sub> emissions, as is clear from the information published in JRC Energy Report 2018 [1]. For this reason, the impact of optimizing the efficiency of these buildings implies not only environmental improvements, but also a reduction in energy dependency. Concerns about improving the energy efficiency of buildings began in the Council Directive 93/76/EEC of 13 September 1993, which approved the Directive “(SAVE)” [2], regarding the limitation of carbon dioxide emissions through improved energy efficiency. This directive consists of a list of actions that member states should take to improve energy efficiency in buildings and thereby reduce their greenhouse gas emissions.

It was followed by the signing of the Kyoto protocol (1997) [3], the publication of Directive 2002/91/EC (Energy Performance of Buildings Directive) [4], which obliges to recent built, sold or rented buildings of member states to be accompanied by an Energy Efficiency Certificate. Later, in 2010, the directive was recast into Directive 2010/31/EU [5], incorporating very important concepts such as the Nearly Zero Energy Consumption Buildings (nZEB building) and being mandatory for buildings constructed from December 31, 2020.

It also sets targets for reducing consumption, increasing the use of renewable energy sources and increasing efficiency by 20% by 2020 and in 2050 an economy with net-zero greenhouse gas emissions [6]. It also establishes the need for a common methodology for calculating the integrated energy performance of buildings. This methodology should integrate all the elements that determine energy efficiency and not only the quality of the building's insulation. This integrated approach should take into account elements such as heating and cooling installations, lighting installations, the location and orientation of the building, heat recovery and renewable energy sources, between others.

Currently, the energy certification model designed contemplates: (i) the architectural aspects of the building; construction materials, geographical area, orientation, insulation, gaps and its typology, etc.; and (ii) the characteristics of the equipment and facilities of the building (lighting, heating, cooling, heat pumps, solar panels, demand for Domestic Hot Water (DHW), demand for air conditioning, etc.) are considered. With all this information and the use of the certification software of each different country [7,8], a “building model” with an energy demand is obtained. In parallel, the software with the data from the architecture and facilities builds the “building object” of the project and obtains a rating.

It is interesting to highlight that the minimal changes in the different input parameters can vary the energy demand. In particular, Dirk Jacob et al. [9] showed how Monte Carlo Method [10] can be employed based on ISO 13790 standard [11] to quantify the impact of uncertainty of model parameters. This effect was related to the fact that building energy systems are no linear, requiring adjustment of previously found optimal solutions.

In 2017, Sørensen et al. [12] employed Monte Carlo method to simulate energy performance and indoor climate in office buildings. In this sense, thousands of combinations were done with Be15 and BSim software showing a great amount of possible solution to let architects choose between possible options. What is more, Østergård [13] developed a study based on BSim software to determine the best way to perform building simulations, showing the main advantages of Monte Carlo Method.

Finally, in the last years, it was found that the TERDMM can support risk-conscious decision-making by explicitly quantifying risks [14], but it is a so complex analysis which is a little far from architects' daily decision-making. In consequence, algorithms or general recommendations to select the best option were no developed. Consequently, most of these works aim that future applications with more complex buildings can be done.

Different recent research works employ the Monte Carlo Method as a mathematical tool to relate the energy consumption with a change in various related variables and not each variable separately [13]. In this sense, most of works, like Sørensen et al. [12], employs the Monte Carlo Method with the instantaneous energy consumption of buildings to be related to energy consumption, looking for a high precision at the cost of greater data insertion time. At the same time, none of these previous works define the economic effect of each energetic improvement. What is more, these methodologies are not too much easy to be employed by engineers for energy rating and decision-making and actually they do it with CE3X software.

In this sense, CE3X is an “efficient” program since it allows technicians to reduce time in preparing the energy rating. Despite this, such a software does not show the optimal retrofitting option (most of time limited to a maximum economic investment). Consequently, the proposed calculation procedure, centered in the ISO 13790, simplifies calculation method and the CE3X software economic investment report (a new output variable of CE3X respect the other similar software resources), thereby aiming to show a new and useful procedure for technicians at the time of retrofitting decision-making.

Finally, as an inverse engineering analysis, future research works will let us to analyze each term of the obtained models and to relate this with the main energy and mass balance equations, which are the origin of the ISO 13790 standard philosophy.

## 2. Materials and Methods

As it was commented before, different software resources are usually employed to define buildings' energy consumption in accordance with the ISO 13790. Despite this, most of them are too much



complex to be employed in an iterative procedure to define the optimal modification towards an energy consumption optimization during the design or retrofitting process.

In consequence, the present study aims to show an original methodology based on this same standard, but implemented with Monte Carlo Method to define the real distribution of the energy consumption and not only an average value as it is showed by most of these software resources and research works [15] as it will be described in the present section.

### 2.1. HULC and CE3x Software

The Spanish ministries of industry, energy and tourism, together with the Spanish Ministry of Development, has delegated the task of making available to the public valid methodologies for the energy efficiency rating of buildings to the Institute for the Diversification and Energy Saving (IDEA [16]). In consequence, to model buildings based on the result of the application of R.D. 235/2013, the following programs are currently recognized:

- Lider Calener 2013 unified tool (HULC);
- CYPETHERM HE Plus by CYPE Ingenieros [17];
- SG SAVE;
- CE3x SOFTWARE [18];
- The CERMA computer program [19].

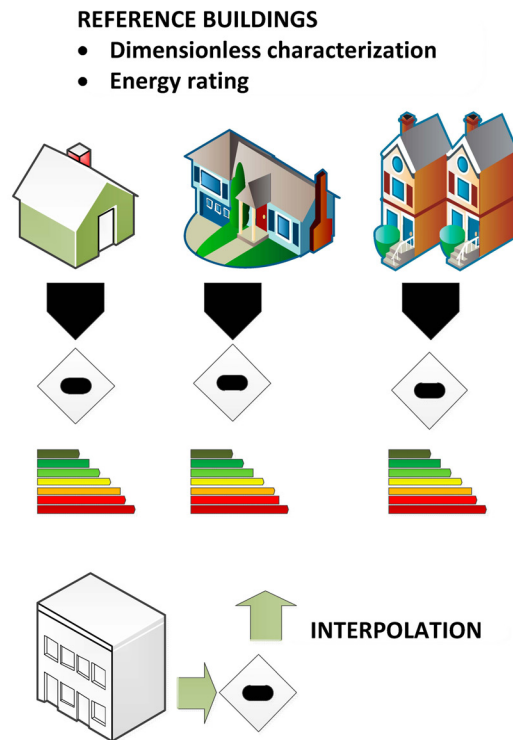
The first one and the most recognized, is the Lider Calener unified tool [20] is a software developed by the Spanish Ministry of Industry, Energy and Tourism. It brings together in one application the Lider and Calener Vyp tools, which were previously developed by a research group from the department of Thermotechnology of the University of Seville belonging to the Andalusian Association for Research and Industrial Cooperation (AICIA, Sevilla, Spain). The tool complies with the provisions of article 4.1 of the Spanish R.D. 235/2013 [21] being the procedure for the energy efficiency rating of a building in Spain. It employs as calculation engine ESTO 2 based on DOE2 developed by the US Department of Energy as the calculation engine. This software was updated in accordance with the energy certification methodology in Spain and has incorporated the latest modifications to the technical building code in the field of energy demand (basic document HE0 [22]) and latest modifications of the regulation of thermal installations in buildings (RITE [23]).

The Lider Calener unified tool is analogous to the CE3X software which was developed by Efinovatic and the Spanish National Centre for Renewable Energies (CENER [8]) and was validated by its own Ministry of Building. In particular, CE3X is another simplified energy rating procedure for existing and new construction buildings, but it presents a new advantage respect other existing software resources due to it generates an economical investment as output report. What is more, this is the more used Spanish software by architects due to the reduce time to introduce the information and get the simulation results.

It is worth noting that this software approaches its simulations to the building objective of study by means of global dimensionless variables and a statistical adjustment [24] respect to buildings simulated previously with the old Calener Vyp, as it is represented in Figure 1. This fact supposes that the CE3X software does not analyze the dynamics of the target building but adjusts the dynamics of a simulated-type building in the provincial capitals with reference software.

In order to use these tools to reach the objective of building energy analysis, an initial problem of entering input data were found. Particularly, in all of them, since modifying a single input parameter requires generating a new project before proceeding to start the calculation engine to analyze the results. To solve this problem, present study shows a new methodology based on modeling the building's energy consumption in spreadsheets using ISO 13790 after being validated by CE3X [25] software results.





**Figure 1.** Calculation procedures of CE3X software.

## 2.2. ISO 13790 standard

At European level, the prEN ISO 13790:1999 was approved in 1999, which gave final form to the ISO 13790:2004 standard, later revised in 2008. In Spain, it was transposed into the UNE-EN ISO 13790:2011 standard [11] as “Energy efficiency of buildings. Calculation of energy consumption for space heating and cooling. (ISO 13790:2008)”. Currently, many of the used programs, both nationally and internationally, use this ISO standard, which generally operates with the inputs shown in Figure 2.

In this sense, ISO13790 employs three calculation procedures to define the Energy needs for heating and cooling, but all of them are centered into heat and mass transfer in the building system as a multiple or just only one zone.

1. Monthly and seasonal method;
2. Simplified time method;
3. Detailed simulation method.

It is interesting to highlight that the second procedure is based on the model of five resistors and one capacitance being a simplification of the dynamic simulation [9] and that the third procedure, dynamic method, must pass the validation tests (Annex A of ISO 13790). In consequence, based on the main objective of stochastic approach, for our research work the monthly and seasonal method was selected. This method was established in three sections to define the heating and cooling energy needs of a building. First, for the heating energy consumption, the ISO 13790:2011 defines the Equations (1) and (2):

$$Q_{H,nd} = Q_{H,nd,cont} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn} \quad (1)$$

where  $Q_{H,nd,cont}$  is the energy needed as continuous heating (MJ),  $Q_{H,ht}$  is the total heat transfer (MJ),  $Q_{H,gn}$  are the total heating gains (MJ) and  $\eta_{H,gn}$  represents a dimensionless factor of use of heat gains (MJ). For cooling energy consumption, the ISO proposes the Equation (2):

$$Q_{C,nd} = Q_{C,nd,cont} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} \quad (2)$$

where  $Q_{C,nd,cont}$  is the continuous cooling energy needed (MJ),  $Q_{C,ht}$  is the heat transfer for the cooling mode (MJ),  $Q_{C,gn}$  are the total heat gains (MJ) and  $\eta_{C,ls}$  represents a dimensionless factor of heat losses (MJ). Finally, for each building zone and calculation step (month in our case study) the heat transfer is calculated in accordance with the Equation (3):

$$Q_{ht} = Q_{tr+} + Q_{ve} \quad (3)$$

where  $Q_{tr+}$  is the total heat transfer (MJ) and  $Q_{ve}$  is the total heat transfer by ventilation (MJ). Finally, total heat gains are defined by the Equation (4):

$$Q_{gn} = Q_{int+} + Q_{sol} \quad (4)$$

where  $Q_{int+}$  are the total internal heat gains in the calculation period (MJ) and  $Q_{sol}$  are the total solar heat gains during the calculation period (MJ).

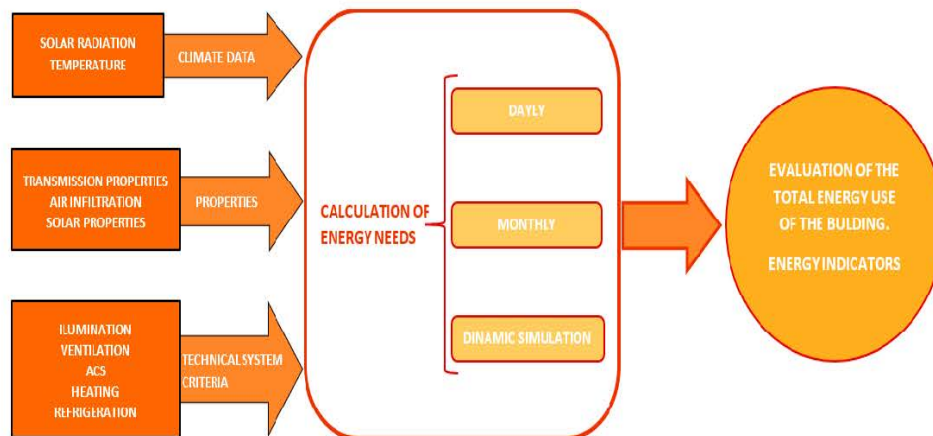


Figure 2. Inputs and outputs of building energetic certification calculation procedures.

### 2.3. MONTECARLO Method

In the search for the energetic optimization of a building, many variables influence its consumption. In order to define which variables are the optimal to reach this objective, a mathematical problem with multiple unknowns and nonlinear variations must be solved.

Currently, the use of computer tools based on “artificial intelligence”, which normally require a “learning” process, is booming. However, many of the input variables that we usually employ in calculating the energy demand of a building have a random component, such as weather, ventilation or solar radiation. Despite this, artificial intelligence procedures will give us just a network of the average value of each variable and, despite the fact it can give us the optimal point of this network, it will not give us the trends of each input data modification in the primary energy consumption.

In previous research works, it was showed that the combination of stochastic models with optimization is rare in the building sector [9]. In this sense, since the mid-1940s, some mathematical tools began to be used for this type of analysis based on the Monte Carlo method [10], which consists

in obtaining a solution limited by the random repetition of innumerable simulations. The random input of values of each variable will lead us to the solution of the problem showing the Gaussian bell of building energy consumption as a function of each input variable. In consequence, with this tool, it was possible to carry out multiple energy simulations by modifying environmental parameters, such as external temperature data, which directly affect the building's energy consumption.

#### 2.4. Proposed Calculation Procedure

Based on this calculation procedure and, once established the possible input variables in accordance with the weather conditions of the region and the commercial values of carpentry, transmittance and type of heating, domestic hot water generation and fuel between others, a stochastic analysis of the probability distribution of each change was done, as it is showed in Figure 3.

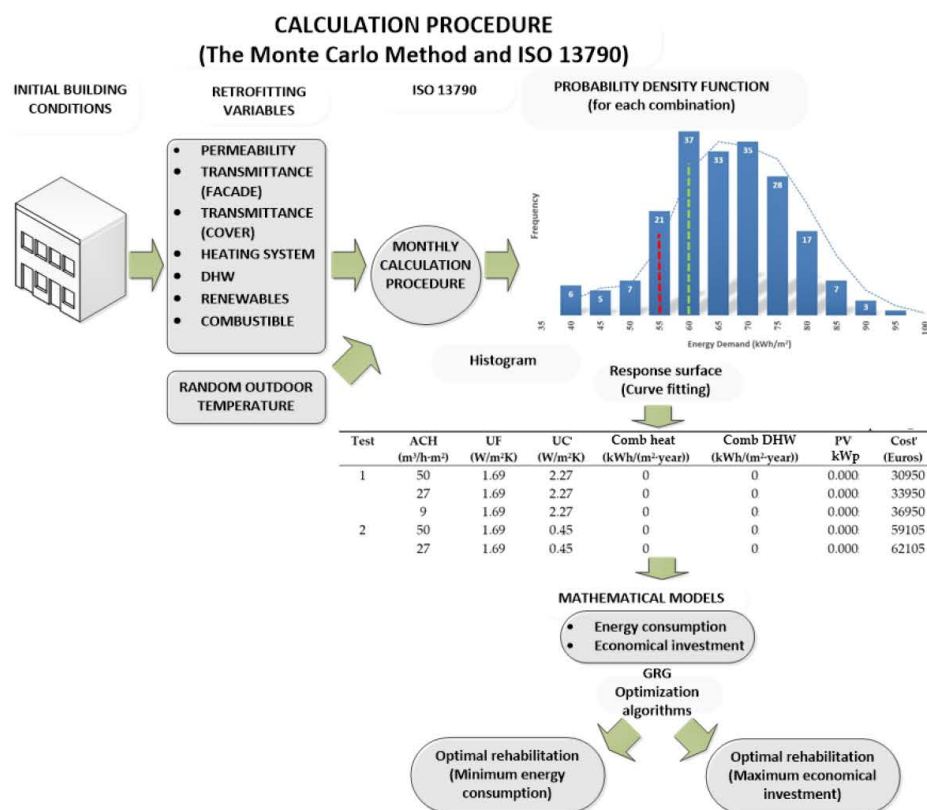


Figure 3. Proposed calculation procedure.

This Figure 3 sum ups the proposed calculation procedure. First, it can be observed the initial building and the retrofitting variables to be selected for each test employed and, combined with a random input of outdoor temperature in the ISO standard to define the probability density function of the primary energy consumption after more than 200 iterations.

From the primary energy consumption defined by the standard and the economic investment, defined by the CE3X software, a list of possible retrofitting combinations was obtained and ordered in accordance different criteria (row number). From this initial step and based on surface response curve fitting, two models were obtained. The first model will give us the primary energy consumption and the other give us the economic investment of each retrofitting process.

Once obtained, these models can be optimized by GRG algorithms to define the optimal retrofitting, which can be that with a minimum possible primary energy consumption or that which implies the minimum energy consumption for a limited maximum economical investment in this retrofitting. These models will give us a new procedure for decision making due to it is a new parameter really needed from the moment that the CE3X software was improved respect previous software resources.

## 2.5. Instrumentation

As is done in most of research work [26,27], to validate calculation procedures, real sampled values are necessary. In this sense, it is interesting to highlight that, since the application of the RITE of 1998, the installation of energy meters in homes is compulsory in Spain. To reach this objective, the M-bus standard is a system developed to cover the need to remotely read energy, gas and electricity or water meters. Most of the equipment installed today complies with this protocol, defined in a standard UNE-EN 1434-3:2016 [25]. When a request is sent to the counter, it returns the information it has collected to be stored in a common master system. This system can be, for example, a computer or any device, which is connected at periodic intervals of time to read the sampled variables. Once the M-Bus meters were available in different buildings, there was a need to carry out a hardware design for the acquisition and storage of readings as it is explained in this section.

## 2.6. Hardware

As starting hardware, a low-cost prototyping equipment was selected under the need to be easy to implement and able to store the volume of information to be processed (data from multiple meters). In particular, the selected hardware is a Raspberry Pi board [28], developed by the “Raspberry Pi Foundation” in England, and which has been marketed since 2012 with the aim of promoting computer science in education centers, becoming a standard and the pillar of development and elaboration of the infinity of prototypes for research.

The selected model, used since 2016, is the version 3 that has Wi-Fi, ethernet, Bluetooth connectivity and infinite possibilities thanks to a GPIO port, as we can see in Figure 4. It is interesting to highlight that the Raspberry PI hardware must be protected in its installation in the electrical panel. What is more, a suitable enclosure that guarantees at least a minimum tightness that avoids direct or indirect contacts in the conventional maintenance operations of the boiler rooms must be selected. In this sense, a Phoenix-contact-type enclosure is chosen, designed according to DIN 43880 standard, they are stackable and can be fixed on a standard DIN rail.

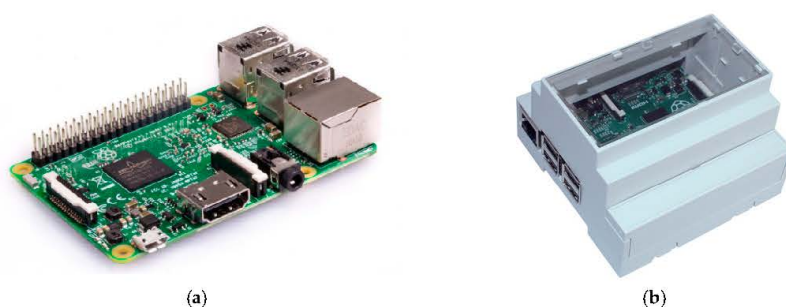


Figure 4. (a) Measurement prototype (b) encapsulated in a Phoenix-type box for DIN rail.

To the hardware of the raspberry, we must add the possibility of M-Bus communication. In this sense, due to most of the boiler rooms have an M-Bus master with RS-232 serial communication, this option was selected. However, it was necessary to incorporate an RS-232 port through compatible USB communication due to Raspberry Pi 3 hardware does not have a serial port. Finally, the complete hardware developed for reading different energy counters is shown in Figure 5.



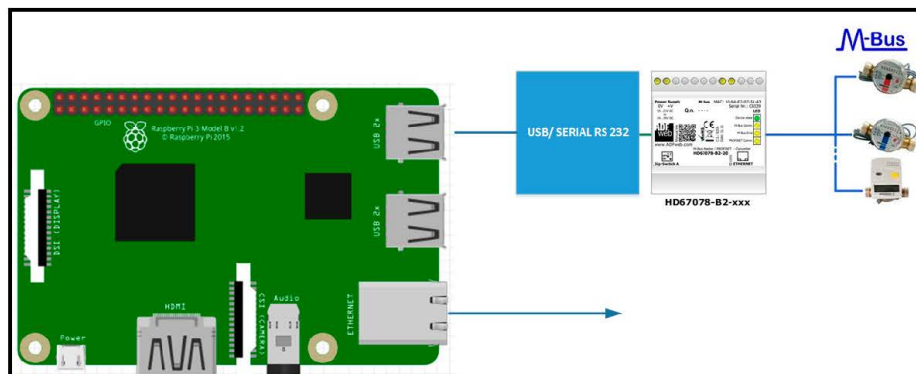


Figure 5. Hardware developed for reading different energy counters.

## 2.7. Software

In this section, the software capable of managing M-Bus communication, reading the counters at a certain frequency and finally storing this information for later analysis is described. The software implemented on the Raspberry Pi, was developed on the Raspbian operating system that comes to be a Raspberry implementation of the most used Linux distributions “Debian”. In addition to being one of the most widely used operating systems in the world, it is free software and has a multitude of open source support that will facilitate the installation and even compilation of all the software necessary for our monitoring process.

In this operating system, drivers for the serial port and a library to be able to access to communicate through the M-Bus protocol were incorporated. For this purpose, the free code library “libmbus” developed and maintained by the Swedish company Raditex Control AB was used. The library is programmed with source code in C language. This library was used to communicate with M-bus slaves (meters) through the wired M-bus protocol incorporating simple applications for network scanning, meter reading and presentation of the data of each meter in XML format, simplifying the future treatment of the information. The library allows us, in addition to the use of the serial port, communication through the TCP IP Internet protocol, being able to access any Mbus Master equipment on the market that we find in the facilities to be monitored.

Thus, our prototype already has tools to communicate, to access a scan or meter reading, although it is necessary to have a place to store such data as a database. Following the line of free software, it was found the option to use the MySQL database [29]. MySQL is a relational database management system developed under two types of licenses: general public license and commercial license by Oracle Corporation. It is considered the most popular open source database in the world and one of the most popular in general with Oracle and Microsoft SQL Server, especially for web development environments. For its implementation in raspberry pi, the public license version is already available in the repository of the “Raspbian [30]” operating system itself, so it was selected to be used as a pillar of the storage of reading data.

Finally, the prototype must have a small web interface to consult the stored data, so a small web application is designed capable of communicating with the database and executing shell commands in Linux. It was selected to program this application in PHP language (hypertext preprocessor), since it is an open source programming language widely used in web development that can be embedded in HTML code.

### 3. Results

The first stage of this work was to measure real sampled data in real buildings and to validate our calculation procedure. To do this, the ISO 13790 standard was implemented in a spreadsheet and its results were compared with the tools recognized by the Spanish Ministry of Industry (CE3X software version 2.3), both applied in an isolated residential building of Figure 6. It is interesting to highlight that this building, after an initial sample of its energy demand, was modified towards a reduction of its energy consumption. In consequence, an initial validation respect CE3X software and standards was done in its initial conditions and, a second validation after a retrofit process, with a more detailed information, was done too.



Figure 6. Building objective of this study.

As it was explained before, the energy certification model designed contemplates the architectural aspects of the building, the characteristics of the equipment and facilities of the building. This information was summarized to be introduced in the CE3X software and in our calculation procedure as:

- Climate zone: C1 (according to D.B. HE1 Spanish construction law)
- Living area: 2343 m<sup>2</sup>
- Number of floors: 5
- Year of construction: 1987 (applicable Spanish standard NBE CT 1979)
- Facade wall (double ceramic brick wall with non-ventilated chamber):  $U = 1.69 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- Building roof (roof with concrete slab and tile):  $U = 2.27 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- Soil:  $U = 0.47 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- Air changes: 0.63 Ach/h
- DHW: 1771 liters/day (at 60 °C)
- Boiler: standard diesel boiler with 1 burner stage (made in 1980)
- Walls transmittance: 1.69
- Roof cover transmittance:  $2.27 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

#### 3.1. Obtained Data and Validation

##### 3.1.1. Validation of the Initial Building Construction

In this case, information such as dimensions, typology of holes and carpentry, domestic hot water (DHW) facilities, boilers and heating installations—among others—were the main input data into the CE3X software. In particular, for all the certifications done, it was defined—for a static value of dry temperatures—to obtain the results of the energy certification shown Figure 7. In this case, the results showed an amount of a total primary energy consumption of 224,500 kWh/m<sup>2</sup> year. What is more,

from the data obtained from the CE3X unified tool, a consumption distribution of 173,410 kWh/m<sup>2</sup> year for heating and 51,040 kWh/m<sup>2</sup> year for DHW was observed in Figure 8.

Primary Energy Consumption per unit floor Area—Not Renewable (kWh/(m <sup>2</sup> year))		Carbon Emissions (kgCO <sub>2</sub> /(m <sup>2</sup> year))	
<24.2	A	<5.4	A
24.2–39.2	B	5.4–8.8	B
39.2–60.7	C	8.8–13.7	C
60.7–93.4	D	13.7–21.0	D
93.4–200.0	E	21.0–45.9	E
200.0–226.0	F	45.9–55.0	F
>226.0	G	>55.0	G

Figure 7. Energy certification of the building.

Heating		Hot Water	
Primary Energy consumption (Heating) (kWh/(m <sup>2</sup> year))	E	Primary Energy consumption (Hot Water) (kWh/(m <sup>2</sup> year))	G
173.410		51.040	
Cooling		Illumination	
Primary Energy consumption (Cooling) (kWh/(m <sup>2</sup> year))	–	Primary Energy consumption (Illumination) (kWh/(m <sup>2</sup> year))	–
0.000		–	

Figure 8. Energy certification from CE3X software.

After this initial analysis, the next step was to carry out the same automatic calculation procedure of the ISO 13790 standard by spreadsheets and validate the obtained results with the CE3X certification. In particular, it is interesting to highlight that the input data used in the spreadsheet are identical to those used with CE3X and the differences obtained are minimal, as we can observe in Table 1. At the same time, the real sample data showed that the information available only corresponds to fuel consumption for heating and reaches amounts to 74,910 kWh/m<sup>2</sup> year. Finally, Table 1 shows a sum up of the different analysis for the same building construction.

Table 1. Calculation procedure validation and actual energy consumption.

Primary Energy Consumption (kWh/(m <sup>2</sup> year))	CE3X	ISO 13790	Real Sampled Data (Previous Retrofitting)
Heating	173,410	173,200	74,910
Domestic hot water	51,040	51,020	
Total	224,500	224,300	

This Table 1 showed an actual consumption much lower than the estimated data of the 177,410 kWh/m<sup>2</sup> year from the CE3X software. The reason why the energy consumption was not in agreement with the certified software resources indications are only the difference of occupation levels between the average expected by the standards and the real occupation. It implies a change in the liters per day of hot water and the real air changes in residential buildings being this effect explained in depth in the section “H.3. Analysis of errors of the ISO 13790”. In particular, in agreement with this H3 section, the half of the obtained energy consumption of the software resources (86,705 kWh/(m<sup>2</sup>·year)) are similar with the real sampled primary energy 74,910 kWh/(m<sup>2</sup>·year).

As it was explained before, this is a consequence of to employ average occupation values (Tabulated in the standard) instead real occupation, which is lower in this case for the particular characteristics of their occupants. Despite this, the aim of the work is to show a new methodology for decision making and, this is a certified software by the Spanish Ministry considering standard conditions.

In consequence, this difference respect real sampled data is not so important for this study and it is of more interest to compare the main results with both software resources (CE3X and ISO 13790 of our calculation procedure).

### 3.1.2. Validation of the Final Building Construction

In this second section, a second validation of the calculation procedure is done in accordance the ISO 13790 respect the CE3X software in this same building after a real retrofit. This retrofit aims to reduce the energy consumption and, in consequence, CO<sub>2</sub> emission and, at the same time, to improve the economic savings. In this sense, the main possibilities for improving a building energy consumption are:

- Level of permeability of the windows carpentry employed.
- Transmittance of current façade
- Transmittance of current cover
- Type of heating system
- Type of domestic hot water system (DHW)
- Type of combustible employed for heating and DHW
- Possibility to install renewable energy sources

Finally, in this particular case study, the owners decided to change the electric boiler for fuel with the aim of unifying the generation of DHW and Heating by installing a gas condensing equipment. This new data was introduced in the CE3X software tool with the aim to recalculate the new certification level after this retrofitting, as it is shown in Figure 9 and is summed up in Table 2.

Primary Energy Consumption Per Unit Floor Area — Not Renewable (kWh/(m <sup>2</sup> year))		Heating		Hot Water	
<24.2	A	Primary Energy consumption (Heating) (kWh/(m <sup>2</sup> year))	E	Primary Energy consumption (Hot Water) (kWh/(m <sup>2</sup> year))	D
24.2–39.2	B	140,690		19,820	
39.2–60.7	C				
60.7–93.4	D	Cooling		Illumination	
93.4–200.0	E	160.510	Primary Energy consumption (Cooling) (kWh/(m <sup>2</sup> year))	Primary Energy consumption (Illumination) (kWh/(m <sup>2</sup> year))	
200.0–226.0	F		–		
>226.0	G	0.000		–	

Figure 9. New certification after retrofitting.

At the same time, once again, to determine the difference between the standards and real sample data, the building's energy consumption for 3 years (2017–2019) was sampled. To do it, the monitoring hardware explained before was employed to record the daily heating and DHW energy consumption. In this sense, the real primary energy consumption during the year 2017 was about 45.948 kWh/m<sup>2</sup> year and it can be compared to the different calculation procedures from Table 2. In particular, the actual primary energy consumption of the building shows much lower value than those presented by the energy certification (28% of the estimate).



**Table 2.** Future energy consumption.

Primary Energy Consumption (kWh/(m <sup>2</sup> year))	Initial Certification	Certification (after Retrofitting)	Real Sampled Data (after Retrofitting)
Heating	173,410	140,690	37,247
DHW	51,040	19,820	7,783
Total	224,500	160,510	45,948

### 3.2. Monte Carlo Method

From the data obtained during 3 years it was concluded that there are important differences respect the calculated energy demand. Regarding the causes of this deviation, the occupation of the building and environmental variables such as outdoor temperature, climatology, etc. were analyzed. In this sense, the present study aims to analyze the outdoor temperature effect over standards indications by means the Monte Carlo method. This iterative methodology will allow us to analyze the impact of multiple variables on the energy efficiency of the building and will let us show the better retrofit option to reach the energetic optimization.

It starts from the modeling of the energy certification method by spreadsheets and into comparing it with the results obtained by the CE3X software, observing that the deviations between the two are minimal, as it was shown in previous sections. After this, the application of the Monte Carlo method over this standard will let us to obtain thousands of energy certifications and the obtained bell of Gauss will let us define a mathematical model that relates main retrofit parameters with the cost of the actions and the energy consumption.

In this sense, the building objective of this study is located in the province of La Coruña, with the environmental data (maximum temperature ( $T_{max}$ ), minimum temperature ( $T_{min}$ ), dry bulb temperature ( $T_{dry\ bulb}$ ), relative humidity (RH)) obtained from DB-HE1 standard showed in Table 3.

**Table 3.** Environmental data from DB HE1 standard.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec
$T_{dry\ bulb}$ (°C)	8.1	9.3	10.8	12.3	15.6	16.0	19.2	19.2	17.1	16.0	11.3	8.8
RH (%)	74.7	64.6	60.2	57.4	57.3	47.0	40.2	42.1	49.7	62.7	70.5	73.8
$T_{min}$ (°C)	4.6	4.0	5.1	6.9	9.6	9.0	11.9	12.2	11.1	11.1	6.9	5.2
$T_{max}$ (°C)	11.7	14.1	15.8	17.0	20.4	21.6	25.3	25.5	22.4	20.8	15.4	12.6

As we can see in Table 3, outdoor temperature data can oscillate between the minimum and maximum-recorded value. With the aim to obtain the probability distribution of the energy consumption for each different retrofitting option, in accordance with the Monte Carlo method indications, the calculation of building energy consumption was modified from this monthly average value to a random one. Because of this random process, a bell of Gauss of the energy consumption for each different possible modification was obtained. In particular, after a minimum of 200 iterations, defined this number in accordance with previous research work results [31–33], it can be carried out an energetic analysis of the energy consumption distribution, respect the value proposed by CE3X software for constant outdoor temperature, reflected in Figure 10.

On one hand, at the time to prepare the energy certification of this building a static value of dry temperatures defined by the Spanish technical building code (Table 3), 0.67 ach and category 2 window permeability (27 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>) was selected and gave us a base value 56.520 kWh/m<sup>2</sup>. On the other hand, if a random outdoor dry bulb temperature is employed, the distribution of frequencies describes a bell of Gauss centered in 63.480 kWh/m<sup>2</sup>. This difference shows the need of an analysis of deviation causes as it will be done in the discussion section.

### 3.3. Optimization Possibilities

In a third phase of analysis, it was proposed to use the Monte Carlo method to the building model in order to observe the impact of the available efficiency measures and obtain an optimization method that maximizes efficiency, minimizing investment. For this, different possibilities of action are proposed like:

- Carpentry (permeability ACH): category 1, 2 or 3 (50, 27 and 9 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>, respectively);
- Transmittance of current façade (UF) 1.69, being able to improve to 1.1 or even 0.59 W/m<sup>2</sup> K;
- Transmittance of current cover (UC) 2.27 and can improve to 1 or even 0.45 W/m<sup>2</sup> K;
- Combustible (Comb): current diesel (0), possible change to natural gas (1);
- Incorporation of photovoltaic energy source (PV): From 0 (current), 5.00, 10.00, 15.00, 20.00, to 25.00 kWp (Maximum).

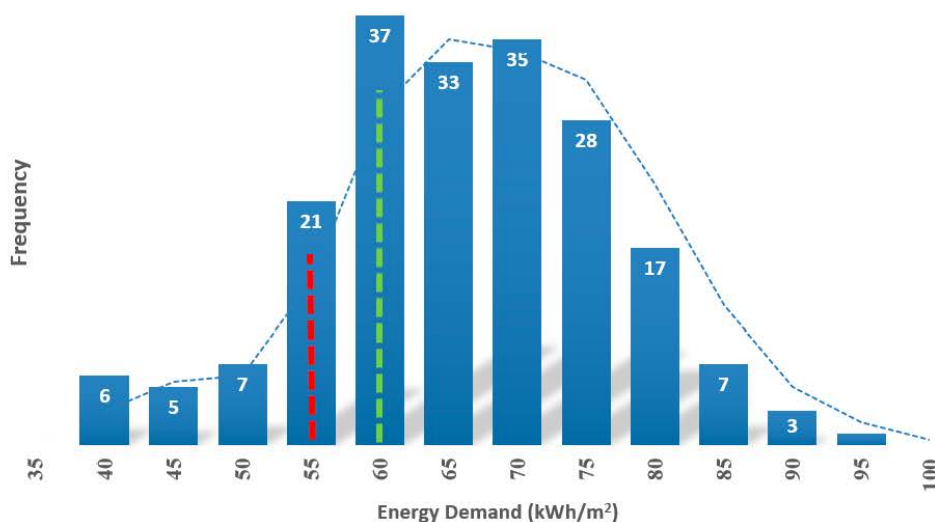


Figure 10. Probability distribution of the energy demand before any retrofit action.

In order to determine the impact of each measure and the impact of each of the possible combinations, we have proceeded to establish the matrix of combinations and in each of them Monte Carlo method was employed in order to determine the average value of the probability of consumption and its related economical cost. The result was sum up in Table 4.

Table 4. Results of Monte Carlo method over each different combination of retrofit options.

Test	ACH (m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup> )	UF (W/m <sup>2</sup> ·K)	UC (W/m <sup>2</sup> K)	Comb_Heat (kWh/(m <sup>2</sup> year))	Comb_DHW (kWh/(m <sup>2</sup> year))	PV (kWp)	Cost (Euros)
1	50	1.69	2.27	0	0	0.000	30,950
	27	1.69	2.27	0	0	0.000	33,950
	9	1.69	2.27	0	0	0.000	36,950
2	50	1.69	0.45	0	0	0.000	59,105
	27	1.69	0.45	0	0	0.000	62,105
	9	1.69	0.45	0	0	0.000	65,105

Table 4. Cont.

Test	ACH (m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup> )	UF (W/m <sup>2</sup> ·K)	UC (W/m <sup>2</sup> ·K)	Comb_Heat (kWh/(m <sup>2</sup> year))	Comb_DHW (kWh/(m <sup>2</sup> year))	PV (kWp)	Cost (Euros)
3	50	1.69	0.45	1	1	0.000	87,260
	27	1.69	0.45	1	1	0.000	90,260
	9	1.69	0.45	1	1	0.000	93,260
4	50	1.69	2.27	1	1	0.000	59,105
	27	1.69	2.27	1	1	0.000	62,105
	9	1.69	2.27	1	1	0.000	65,105
5	50	1.69	2.27	1	1	0.000	95,985
	27	1.69	2.27	1	1	0.000	98,985
	9	1.69	2.27	1	1	0.000	101,985
6	50	0.55	2.27	0	0	0.000	152,950
	27	0.55	2.27	0	0	0.000	155,950
	9	0.55	2.27	0	0	0.000	158,950
7	50	0.55	2.27	0	0	0.000	181,105
	27	0.55	2.27	0	0	0.000	184,105
	9	0.55	2.27	0	0	0.000	187,105
8	50	0.55	2.27	1	1	0.000	209,260
	27	0.55	2.27	1	1	0.000	212,260
	9	0.55	2.27	1	1	0.000	215,260
9	50	1.69	0.45	1	1	0.000	95,985
	27	1.69	0.45	1	1	0.000	98,985
	9	1.69	0.45	1	1	0.000	101,985
10	50	0.55	0.45	1	1	0.000	217,985
	27	0.55	0.45	1	1	0.000	220,985
	9	0.55	0.45	1	1	0.000	223,985
11	50	1.69	0.45	0	0	25.000	60,950
	27	1.69	0.45	0	0	25.000	63,950
	9	1.69	0.45	0	0	25.000	66,950
12	50	1.69	0.45	0	0	12.000	45,950
	27	1.69	0.45	0	0	12.000	48,950
	9	1.69	0.45	0	0	12.000	51,950
13	50	1.69	0.45	1	1	25.000	74,105
	27	1.69	0.45	1	1	25.000	77,105
	9	1.69	0.45	1	1	25.000	80,105

With these experiments, a response surface was carried out by Minitab software, trying to obtain a polynomial capable of determining the energy and economical effects of the possible retrofit combinations. The obtained polynomials are defined by the Equations (5) and (6) with a determination factor of 85.26 and 97.42, respectively.

$$\text{Cost} = 254641 - 198 \cdot \text{ACH} - 107018 \cdot \text{UF} - 15,470 \cdot \text{UC} + 29,037 \cdot \text{Comb}_{\text{heat}} + 1200 \cdot \text{PV} + 0.88 \cdot \text{ACH}^2 + 7735 \cdot \text{UC} \cdot \text{Comb}_{\text{heat}} - 1338 \cdot \text{Comb}_{\text{heat}} \cdot \text{PV} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Energy consumption} &= 209 - 0.99 \cdot \text{ACH} - 14 \cdot \text{UF} - 1.9 \cdot \text{UC} - 65.2 \cdot \text{Comb}_{\text{heat}} - 2.46 \cdot \text{PV} \\ &+ 0.0232 \cdot \text{ACH}^2 + 0.1044 \cdot \text{PV}^2 + 0.075 \cdot \text{ACH} \cdot \text{UF} - 0.09 \cdot \text{ACH} \cdot \text{UC} \\ &- 0.596 \cdot \text{ACH} \cdot \text{Comb}_{\text{heat}} + 0.0053 \cdot \text{ACH} \cdot \text{PV} + 14.09 \cdot \text{UF} \cdot \text{UC} + 34 \cdot \text{UF} \\ &\cdot \text{Comb}_{\text{heat}} - 25.16 \cdot \text{UC} \cdot \text{Comb}_{\text{heat}} - 1.239 \cdot \text{Comb}_{\text{heat}} \cdot \text{PV} \end{aligned} \quad (6)$$

#### 4. Discussion

In this section, an analysis of the different results obtained is done with the aim of the understanding of the obtained models and the better way to employ this towards building design and retrofit.

##### 4.1. Deviation Causes Analysis

It begins by consulting the average outside temperatures obtained from the nearest meteorological station—and by comparing these with those used in the calculation of the CE3X program—as we can see in Table 5. From Table 5 it was observed that the annual average temperature values have decreased by 1.05% compared to the reference one defined by the standard. This would imply a slightly higher consumption than the obtained in the certification, although we have obtained 43.69 kWh/m<sup>2</sup> year compared to 160.51 kWh/m<sup>2</sup> calculation.

**Table 5.** Monthly average outdoor temperature (from standards and sampled values).

T <sub>outdoor</sub> (°C)/month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec
standard	8.19	9.31	10.82	12.33	15.60	16.09	19.29	19.28	17.15	16.08	11.31	8.87
2017	7.33	9.65	10.59	13.53	15.94	18.18	18.41	18.68	15.71	15.92	10.03	8.36
Deviation (%)	10.44	3.67	−2.15	9.72	2.20	12.97	−4.56	−3.15	−8.39	−1.00	11.30	−5.76

Performing the same analysis in the period 2017–2019, it was obtained that the values of total annual consumption have increased (21.7%) from the year 2017 to 2018. In the 2018–2019 period, the energy consumption decreased by 8.63%, while the average temperature decreased by 0.52%.

It was observed that the average outdoor temperature is more or less constant, decreasing slightly each year, so the slight increase in consumption registered in 2018 and 2019 has its justification, as demand and occupancy of the building continue.

##### 4.2. Numeric Optimization

These two Equations (5) and (6) are in accordance with commons sense expectative. In this way, the equation of cost shows a base value of 254,641 euros which is more reduced when the variables ACH, UF, UC experiment their highest values related with the actual conditions and low-cost materials. It is interesting to highlight that it happens when the boiler is not changed (0) due to, in this condition, the photovoltaic electrical production will exert an inverse effect increasing the cost at the time that the PV production increases. When a change of boiler is done, this previous effect of the PV production is modified by new terms of this Equation (1) that now are not neglected.

If we now analyze the second equation, Equation (2), the same conclusions cannot be obtained so easily about the effect of each variable in the energy consumption.

With the mathematical models defined by Equations (5) and (6), it can be now obtained the energy consumption and economic investment of each possible retrofits process (columns 4–8 of Tables 6 and 7). If all these possibilities are ordered in accordance with their economic investment (row number), it is obtained Table 6. In consequence, Table 6 starts in row 1 showing the more expensive actions in the building and its related energy consumption. In consequence, on one hand, it was observed that the investment with the highest economical cost does not provide the lowest energy consumption. In this sense, a selection of carpentry category 1 (the best), transmittance of facade 0.59 (the best), transmittance of cover 0.45 (the best), natural gas and nonincorporation of photovoltaic electrical production corresponds to an investment of 215,345 € and reduces consumption to 134.800 kW/m<sup>2</sup> as we can see in Table 6 in its row 1.



Table 6. Retrofit options ordered by cost.

Row	Cost (€)	Primary Energy Consumption (kWh/m <sup>2</sup> year)	ACH (m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup> )	UF (W/m <sup>2</sup> K)	UC (W/m <sup>2</sup> K)	Comb_Heat	PV (kWp)
1	215,345	134,802	9	0.59	0.45	1	0.000
2	214,655	119,156	9	0.59	0.45	1	5.000
3	213,965	108,729	9	0.59	0.45	1	10.000
4	213,275	103,523	9	0.59	0.45	1	15.000
5	212,585	103,536	9	0.59	0.45	1	20.000
6	212,352	121,355	27	0.59	0.45	1	0.000
7	211,895	108,770	9	0.59	0.45	1	25.000
8	211,662	106,186	27	0.59	0.45	1	5.000
9	211,091	124,046	9	0.59	1.00	1	0.0000
10	210,972	96,236	27	0.59	0.45	1	10.000
11	210,401	108,400	9	0.59	1.00	1	5.000
12	210,282	91,507	27	0.59	0.45	1	15.000
13	209,834	201,237	27	0.59	0.45	0	25.000
14	209,711	97,973	9	0.59	1.00	1	10.000
15	209,592	91,997	27	0.59	0.45	1	20.000
25	207,286	98,031	50	0.59	0.45	1	15.000
26	206,838	222,688	50	0.59	0.45	0	25.000
27	206,717	84,589	27	0.59	1.00	1	10.000
28	206,596	99,131	50	0.59	0.45	1	20.000
29	206,027	79,860	27	0.59	1.00	1	15.000
42	201,268	99,209	9	0.59	2.27	1	0.000
50	198,274	82,813	27	0.59	2.27	1	0.000
51	197,834	182,646	27	0.59	0.45	0	15.000
52	197,818	73,176	9	0.59	2.27	1	25.000
53	197,584	67,644	27	0.59	2.27	1	5.000
54	196,894	57,694	27	0.59	2.27	1	10.000
55	196,204	52,965	27	0.59	2.27	1	15.000
56	195,514	53,455	27	0.59	2.27	1	20.000

In this Table 6, it can be observed that the effect to change the boiler from the diesel boiler (0) to a natural gas boiler (1) will exert a higher effect over the final cost with independence of the level of photovoltaic energy generated. This maximum cost is obtained for changing the boiler and carpentry and transmittances in its better values, as we can see in rows 1 to 5. At the same time, the PV production exerts in these initial combinations a slight decrement of the cost at the time PV value increases.

From this same table, it can be observed that, only when the maximum available photovoltaic energy production is combined with a carpentry level 2, without changing the diesel boiler, the cost will be as higher than the previous combinations after changing to a natural gas boiler, see row 13. Despite this similar economical cost of retrofit combinations, it can be observed that the change to PV production instead a boiler implies a so high-energy consumption of 201.000 kWh/m<sup>2</sup> in this row 13 which is nearly the double of the energy consumption of the previous combination showed in the row 12 for nearly the same economical investment.

Another conclusion that can be observed from this Table 6 is that the maximum investments are always obtained remaining the transmittance of the facade and the cover in its minimum value of 0.59 (W/m<sup>2</sup>·K) and 0.45 (W/m<sup>2</sup>·K), respectively.

Finally, looking for the optimization of the energy consumption equation, Equation (2), it was obtained that the better option is carpentry category 2 (medium), transmittance of facade 0.59 (the best), transmittance of cover 2.27 (the current one), natural gas as fuel and the incorporation of photovoltaic energy production 15.000 kWp. This investment corresponds to 196,204 € and reduces consumption to 52.970 kWh/m<sup>2</sup>, as we can see in Table 6 row 55.

To understand why a more expensive retrofit process will not reach the optimal building design some explanations must be done. In this sense, it is interesting to remember that it is a so complex and nonlinear process where each modification from the more expensive retrofit to the optimal one must be analyzed in depth. In this sense, row 4 of Table 6 shows that just improving the photovoltaic energy production, an initial reduction of the investment and energy consumption is observed. What is more, in row 6 just changing the carpentry permeability to a no so tight material respect the more expensive case implies a reduction of the cost and the energy consumption, but it is not so intense than changing the PV production.

Finally, the row 42 of Table 6 shows a high decrement of the economical investment and energy consumption due to, in this case, a building without changing the transmittance of the cover is considered. The simultaneous combination of all these modifications will let to reach the optimal retrofit at the lowest cost, row 55.

From this result, it can be concluded that, for the particular weather condition of the region where the building is placed, the effect of the facade is more important that the effect of the transmittance of the cover. Furthermore, this modification combined with a change of the boiler are the main parameters towards a reduction of the energy consumption.

Another derived conclusion is that, in this case study, an increment of infiltrations, within reasonable values, will exert a decrement of energy consumption and economical investment. This same effect happens with solar panels, but, as it will be observed in Figure 11, the effect of PV is not a linear variable and, to reach the optimal point, an intermediate value of 15.000 kWp must be employed.

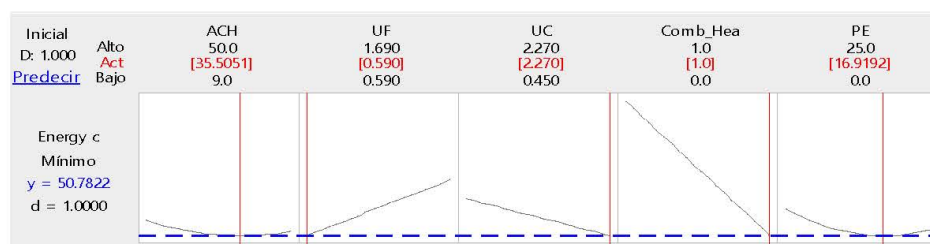


Figure 11. Numeric optimization of the mathematical model.

#### 4.3. Numeric Optimization for a Limit Investment

Now, based on previous results showed in Table 6, a polynomial optimization was done with tabulated data and by generalized reduced gradient (GRG) algorithm. For this optimization process, standard values of each input variable such as insulation levels, carpentry category, etc. were employed. In this way, implementing the different bounded and tabulated variables, the combinations are obtained, being able to select the optimal one for the limit of the investment desired. In particular, the possible solutions obtained, excluding that with a higher economical investment than 100,000 euros (maximum investment), were ordered in accordance with the minimum energy consumption, as we can see in Table 7.

In our case study, it can be observed that, to make an investment in efficiency with a maximum budget of 100,000 euros, there are many combinations, but the one that obtains the highest level of energy efficiency is to employ a carpentry category 2 (medium), transmittance of facade 1.69 (the current one), transmittance of cover 1, natural gas as fuel and the incorporation of photovoltaic electrical production (15 kWp). This investment corresponds to 78,484 euros and reduces consumption to 112,375 kW/m<sup>2</sup>, as we can see in Table 7, row 1. This conclusion is in clear agreement with previous results and shows that just a reduction in the investment in the facade is enough to reduce the cost and, in consequence, it must be the initial variable to be analyzed at the time to take this so important decision.

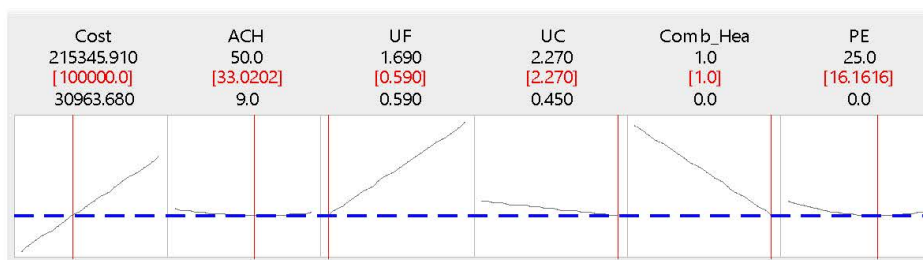
**Table 7.** Retrofit options ordered by energy consumption (limited to an investment (100,000 €).

Row	Cost (€)	Primary Energy Consumption (kWh/m <sup>2</sup> year)	ACH (m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup> )	UF (W/m <sup>2</sup> K)	UC (W/m <sup>2</sup> K)	Comb Heat	PV (kWp)
1	78,484	112,375	27	1.69	2.27	1	15.000
2	77,794	112,866	27	1.69	2.27	1	20.000
3	75,489	117,029	50	1.69	2.27	1	15.000
4	79,174	117,105	27	1.69	2.27	1	10.000
5	74,799	118,129	50	1.69	2.27	1	20.000
6	77,104	118,576	27	1.69	2.27	1	25.000
7	88,308	119,586	27	1.69	1.00	1	15.000
8	87,618	1,200,772	27	1.69	1.00	1	20.000
9	76,179	121,149	50	1.69	2.27	1	10.000
10	92,562	122,709	27	1.69	0.45	1	15.000
11	91,872	123,200	27	1.69	0.45	1	20.000
12	88,998	124,316	27	1.69	1.00	1	10.000
13	74,109	124,449	50	1.69	2.27	1	25.000
50	87,382	154,889	50	1.69	1.00	1	0.000
51	83,548	157,134	9	1.69	2.27	1	0.000
52	91,636	159,150	50	1.69	0.45	1	0.000
53	93,371	162,288	9	1.69	1.00	1	0.000
54	97,626	164,519	9	1.69	0.45	1	0.000
55	74,114	174,983	27	1.69	0.45	0	10.000

Once again, in Table 7, row 1, it can be observed that the lowest economical investment will reach the highest energy saving after changing the boiler to natural gas (1), remaining the transmittance in facade and cover in its worst values and just modifying the medium values of carpentry (Level 2) and photovoltaic electrical production.

At the same time, it can be observed that it is of interest to not change the boiler and the transmittance of the facade only when the transmittance is changed to a better value in the cover and intermediate value of PV production and carpentry, as it can be observed in its row 55. In consequence, it can be observed that the maximum transmittance (the worst) in the facade remains as one of the more important parameters linked to this low energy consumption list.

As it was explained before, if the numeric optimization is done without any limitation and supposing that all the variables are continuous, the minimum energy consumption is defined at 35 ACH, 059 UF, 2.27 UC, Comb heat changed to natural gas and a PV of 16.910 kWp, as we can see in Figure 11. What is more, if now the cost is limited to a value of 100,000 Euros, the proposal of retrofits to a minimum energy consumption is similar to the ideal situation and just a little improvement in carpentry (from 35.50 m<sup>3</sup>/h·m<sup>2</sup> to 33.02 m<sup>3</sup>/h·m<sup>2</sup>) is proposed, as we can see in Figure 12.

**Figure 12.** Numeric optimization of the mathematical limited to an investment of 100,000 Euros.

Finally, it is interesting to highlight that all the methodology developed showed a so interesting procedure to understand the real effect of each different variable defined by standards over building



energy consumption and economical investment being a so interesting tool at the time of decision making by architects and engineers.

## 5. Conclusions

The present study shows an original methodology based on the Monte Carlo method applied in the ISO 13790 standard to define the optimal energetic and economical retrofit to do in buildings to reach the better improvement under low cost. Results showed that, in disagreement with the expected results, the more expensive retrofit is not the more efficient and an adequate combination of these modifications will let architects and engineers to get the better energy savings for an initial fixed amount of money to invest. In consequence, present study shows a new procedure to be employed as a guide to architects and engineers at the time to take some decisions during its building designs and retrofit.

**Author Contributions:** Conceptualization and methodology, A.E.M.-B. and J.A.O.; validation and formal analysis, A.E.M.-B. and J.A.O.; data curation, A.E.M.-B., J.A.O. and D.V.; writing—original draft preparation, A.E.M.-B., J.A.O. and D.V.; writing, review and editing, A.E.M.-B., J.A.O. and D.V. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Acknowledgments:** The authors wish to express their deepest gratitude to Paula Serrano Yuste, Architect LEED AP BD+C ([www.certificadosenergeticos.com](http://www.certificadosenergeticos.com)) for the technical advice in the development of this research work.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## References

1. Kyoto protocol. 1997. Available online: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/kyoto-protocol> (accessed on 11 June 2020).
2. Analysis of the Annual Reports 2018 under the Energy Efficiency Directive. 2018. Available online: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/analysis-annual-reports-2018-under-energy-efficiency-directive> (accessed on 11 June 2020).
3. The Council Directive 93/76/EEC of 13 September 1993. 1993. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A31993L0076> (accessed on 11 June 2020).
4. Directive 2002/91/EC. Energy Performance of Buildings Directive. 2002. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32002L0091> (accessed on 11 June 2020).
5. Directive 2010/31/EU. Nearly Zero Energy Consumption Buildings. 2010. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32010L0031> (accessed on 11 June 2020).
6. European Commission. 2050 Long-Term Strategy. Available online: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en) (accessed on 11 June 2020).
7. CYPETHERM HE Plus by CYPE Ingenieros. 2013. Available online: <http://cypeterm-he.cype.es/> (accessed on 11 June 2020).
8. Basic Document HE0. Spanish Ministry of Development. 2019. Available online: <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf> (accessed on 11 June 2020).
9. Jacob, D.; Burhenne, S.; Florita, A.R.; Henze, G.P. Optimizing building energy simulation models in the face of uncertainty. In Proceedings of the Fourth National Conference of IBPSA-USA, New York, NY, USA, 11–13 August 2010.
10. Johansen, A.M.; Monte Carlo method. International Encyclopedia of Education (Third Edition). 2010. Available online: <https://www.sciencedirect.com/topics/neuroscience/monte-carlo-method> (accessed on 11 June 2020).
11. UNE-EN ISO 13790:2011. Energy Performance of Buildings—Calculation of Energy use for Space Heating and Cooling (ISO 13790:2008). Available online: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une?c=N0048301> (accessed on 11 June 2020).
12. Sørensen, M.J.; Myhre, S.H.; Hansen, K.K.; Silkjær, M.H.; Marszał-Pomianowska, A.J.; Liu, L. Integrated building energy design of a danish office building based on Monte Carlo simulation method. In Proceedings of the 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, Trondheim, Norway, 11–14 June 2017.



13. Østergård, T.; Jensen, R.L.; Mikkelsen, F.S. The best way to perform building simulations? One-at-a-time optimization vs. Monte Carlo sampling. *Energy Build.* **2020**, *208*, 109628. [CrossRef]
14. Zheng, D.; Yu, L.; Wang, L. A techno-economic-risk decision-making methodology for large-scale building energy efficiency retrofit using Monte Carlo simulation. *Energy* **2019**, *189*, 116169. [CrossRef]
15. Alekseeva, N.; Antoshkova, N.; Pupentsova, S. Application of the Monte-Carlo Simulation Method in Building and Energy Management Systems. EMMFT-2018. In *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; pp. 257–266.
16. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. Ministry for ecological transition and demographic challenge. IDEA. Available online: <https://www.idae.es/> (accessed on 11 June 2020).
17. Regulation of Thermal Installations in Buildings (RITE). 2007. Available online: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=99&nr=187&menu=1449> (accessed on 11 June 2020).
18. UNE-EN 1434-3: 2016 Heat meters—Part 3: Data Exchange and Interfaces. 2016. Available online: <https://www.en-standard.eu/une-en-1434-3-2016-heat-meters-part-3-data-exchange-and-interfaces/> (accessed on 11 June 2020).
19. Raspberry Pi board. 2020. Available online: <https://www.raspberrypi.org/products/> (accessed on 11 June 2020).
20. Lider Cálenor Unified Tool (HULC). 2020. Available online: <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener.html> (accessed on 11 June 2020).
21. SG SAVE. 2008. Available online: <http://www.efinovatic.es/energyPlus/> (accessed on 11 June 2020).
22. The CERMA computer program. Spanish Ministry of Industry and Sustainable Development 2016. Available online: <https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/procedimientos-certificacion-proyecto-terminados.aspx> (accessed on 11 June 2020).
23. Spanish Royal Decree 235/2013. Approving the Basic Procedure for the Certification of the Energy Performance of Buildings. Available online: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-3904> (accessed on 11 June 2020).
24. Carnero, P. Análisis y Estudio de la Simulación Energética de Edificios Residenciales con Programas Reconocidos. VII Congress in Nearly Zero Energy Buildings. Madrid 5 November 2020. Available online: <https://www.congreso-edificios-energia-casi-nula.es/> (accessed on 11 June 2020).
25. CE3X 2018. Available online: <https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/procedimientos-certificacion-proyecto-terminados.aspx> (accessed on 11 June 2020).
26. MySQL Database. 2020. Available online: <https://www.datadoghq.com/dg/monitor/mysql-benefits-b/> (accessed on 11 June 2020).
27. Raspbian Operating System. 2020. Available online: <https://www.raspberrypi.org/downloads/> (accessed on 11 June 2020).
28. Dunn, W.; Shultis, J.K. *Exploring Monte Carlo Methods*, 1st ed.; Elsevier Science: Amsterdam, the Netherlands, 2011; Hardcover ISBN: 9780444515759; eBook ISBN: 9780080930619.
29. Orosa, J.A. Thermal inertia and ISO 13790—Have its effects on future energy consumption been fully considered? *Energy Educ. Sci. Technol. Part A Energy Sci. Res.* **2012**, *29*, 339–352.
30. Orosa, J.A.; García-Bustelo, E.J. Permeable coverings as a sustainable solution for indoor air thermal comfort and energy saving. *Energy Educ. Sci. Technol. Part A Energy Sci. Res.* **2012**, *29*, 583–596.
31. Seong-Hwan, Y.; Cheol-Soo, P. Objective building energy performance benchmarking using data envelopment analysis and Monte Carlo Sampling. *Sustainability* **2017**, *9*, 780. [CrossRef]
32. Favi, C.; Di Giuseppe, E.; D’Orazio, M.; Rossi, M.; Germani, M. Building retrofit measures and design: A probabilistic approach for LCA. *Sustainability* **2018**, *10*, 3655. [CrossRef]
33. Nematchoua, M.K.; Vanona, J.C.; Orosa, J.A. Energy efficiency and thermal performance of office buildings integrated with passive strategies in coastal regions of humid and hot tropical climates in Madagascar. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 2438. [CrossRef]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## **7.5 CAPÍTULO LIBRO**

Se ha elaborado un capítulo de libro de investigación titulado ""Statistical Understanding and Optimization of Building Energy Consumption and Climate Change Consequences", de la editorial IGI-GLOBAL, que ha sido aceptado y será publicado en breve dentro del libro "Advancements in Sustainable Architecture and Energy Efficiency".